



Nuno Gil Cristóvão Soares

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Verificação da Aplicabilidade do Método
Building Blocks a Peças Fabricadas por
Impressão 3D por Extrusão de Polímero**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins,
Professor Auxiliar, FCT-UNL/DEMI

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António José Freire Mourão

Arguentes: Eng^o. Mário Almeida Santos
Prof. Doutor João Manuel Vicente Fradinho

Vogal: Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2017

LOMBADA



**Verificação da Aplicabilidade do Método de *Building Blocks* a Peças
Fabricadas por Impressão 3D por Extrusão de Polímero**

2017

Verificação da Aplicabilidade do Método de *Building Blocks* a Peças Fabricadas por Impressão 3D por Extrusão de Polímero

Copyright, 2017, Nuno Gil Cristóvão Soares, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos e Dedicatória

O autor gostaria de agradecer a todos os que contribuíram para a realização desta tese de mestrado, em particular ao Professor Rui Martins e ao colega João Gomes.

Dedico este trabalho ao meu Pai, Mãe e Irmã.

Resumo

A impressão 3D (ou fabrico aditivo) é uma tecnologia recente que tem vindo a mostrar nos últimos anos um potencial para aplicações industriais cada vez mais útil e atraente para empresas de produção de várias áreas. Contudo, encontra-se na fase comum a todas as tecnologias emergentes em que a falta de regulamentação e metodologias de teste normalizadas dificulta não só a sua implementação à larga escala num contexto industrial como a obtenção de resultados satisfatórios no fabrico de peças, que pode ir de uma situação de prototipagem à sua utilização em peças de uso final. Esta dissertação de mestrado concerne o caso da impressão 3D por extrusão de filamento polimérico, começando por analisar a sua tecnologia inerente, o estado de arte da mesma, as barreiras mais importantes a ultrapassar para a sua otimização e implementação e os materiais que usa. Posteriormente, é feita uma análise das normas para o teste de materiais poliméricos quando processados por este método e da importância e atuais falhas dessa normalização, culminando com uma sugestão de metodologia sustentável de teste de partes processadas por esta tecnologia, num contexto industrial. É feito um esforço constante para abordar esta tecnologia e o seu uso de uma perspectiva metódica e aliada a todos os esforços feitos para a normalização já existentes, de modo a aliar a mitigação de custos e a obtenção de bons resultados com a regulamentação e certificação de materiais poliméricos a utilizar. Tendo em conta este contexto, a grande parte dos textos utilizados e a bibliografia mais importante para trabalho vêm ou de organizações regulamentadoras ou de organizações que as acompanham e fazem pesquisa científica nesta área, orientada para a coordenação das normas com as tecnologias existentes, principais ou acessórias. A aplicabilidade da metodologia proposta é analisada em três instâncias com recurso a ensaios experimentais, usando o Nylon-6 como caso de estudo.

Palavras-chave: impressão 3d; nylon-6; caracterização de materiais; normalização; *building blocks*

Abstract

3D-printing (or additive manufacturing) is a recent technology, which, in these last years, has proven to have potential for industrial applications, making it a useful prospect for production companies in various fields. However, 3D-printing is at the stage common to all emerging technologies where the lack of regulation and standardized test methods hinders not only its large-scale implementation, on an industrial context, but also the quality of what it can produce, which may go from prototyping to its usage in the manufacturing of finished parts. The work in this thesis deals with the case of 3d-printing by polymer filament extrusion, starting by analysing its technological principles, its state of the art, the biggest challenges it must overcome for its implementation and optimization and the materials it uses. Then, an analysis is made of the existing standards for the testing of polymer materials processed with this technology and of the importance and current drawbacks of such a standardization, culminating in the proposal of a sustainable testing method for the parts produced in an industrial context. An effort has been made to constantly approach this technology and its usage in a methodical manner, allied with the standardization work already made, in a way that combines cost reductions and the attainment of satisfying results with the regulation and certification of the polymer materials being used. In this context, the greater part of the research used and the most important bibliography come from either regulatory agencies or organizations that conduct scientific research in this field, aiming for the coordination of standards with the existing technologies. The applicability of the suggested methodology is analysed through the use of experimental work with Nylon-6 being the case-study material.

Keywords: 3D-printing; nylon-6; materials characterization; standardization; building blocks

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Resumo dos princípios tecnológicos da extrusão de polímero	4
1.4	Estrutura	7
2	Medição e Impressão 3D.....	9
2.1	Caracterização do material	9
2.2	Modelação e medição do processo	11
2.3	Normas para uso em impressão 3D	13
3	Metodologias de teste.....	17
3.1	Descrição geral do método de <i>building blocks</i>	18
3.2	Tipos de teste.....	23
3.3	Pertinência e adaptação à realidade de impressão 3D e enquadramento na tese	27
4	Material	33
4.1	Caracterização	34
4.2	Fabricante	36
4.3	Propriedades	39
5	Ensaio Experimentais.....	41
5.1	Teste de provetes	41
5.1.1	Objetivo	41
5.1.2	Norma ISO 527.....	42
5.1.3	Impressão dos provetes.....	51
5.1.4	Procedimento experimental	58
5.1.5	Resultados	61
5.2	Teste de subcomponentes	64
5.2.1	Objetivo	64
5.2.2	Modelação e impressão do reservatório.....	65
5.2.3	Simulação numérica do reservatório pressurizado	68
5.2.4	Procedimento experimental	71
5.2.5	Resultados	72
5.3	Teste de componentes.....	73
5.3.1	Objetivo	73
5.3.2	Modelação e impressão do cabide	74
5.3.3	Simulação	77
5.3.4	Procedimento experimental	81
5.3.5	Resultados	83
6	Análise de Resultados.....	85
6.1	Teste de Provetes.....	85
6.2	Teste de subcomponentes	88
6.3	Teste de componentes.....	90
7	Conclusões	95

Referências	98
Anexos.....	101
A - Dimensões do Cabide	101
B - Dimensões do Reservatório	102
C - Resultados individuais para os provetes da série -45°/45°	103
D - Resultados individuais para os provetes da série 0°/90°	104
E - Relatório do teste de provetes segundo a norma ISO 527	105

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Esquema do funcionamento de uma impressora de extrusão de polímero	6
Figura 3. 1 Factores que influenciam o método de building blocks (Fonte: Manual de Materiais Compósitos, Dep. de Defesa dos EUA)	18
Figura 3. 2 Método de building blocks integrado numa situação de projeto (adaptado do Manual de Materiais Compósitos, Dep. de Defesa dos EUA)	19
Figura 3. 3 Testes do método de building blocks e o tipo de informação que fornecem (adaptado do Manual de Materiais Compósitos, Dep. de Defesa dos EUA)	24
Figura 4. 1 Bobina de filamento de Nylon 645, utilizado neste trabalho	33
Figura 4. 2 Estrutura do Nylon-6 VS. Nylon-6,6	34
Figura 4. 3 Processo de formação do Nylon-6	34
Figura 4. 4 Logo da taulman3D (Fonte: website da taulman3D)	37
Figura 4. 5 Panfleto informativo embalado com o filamento de Nylon 645	38
Figura 5. 1 Dimensões dos provetes tipo 1B (Fonte: Norma ISO 4527-4:1997).....	46
Figura 5. 2 Orientação da deposição de material nas duas séries de provetes	46
Figura 5. 3 Orientação dos provetes das séries -45°/45° e 0°/90° no Cura.	52
Figura 5. 4 Impressão dos provetes da série 0°/90°	55
Figura 5. 5 Impressão dos provetes da série -45°/45° (pormenor)	55
Figura 5. 6 Posições de medição no provete para a confirmação de tolerâncias	58
Figura 5. 7 Série de provetes -45°/45°	59
Figura 5. 8 Série de provetes 0°/90°	60
Figura 5. 9 Montagem experimental para o teste de provetes	61
Figura 5. 10 Curvas de tensão/extensão para os provetes da série -45°/45°	62
Figura 5. 11 Curvas tensão/extensão para os provetes da série 0°/90°	63
Figura 5. 12 Modelo CAD utilizado na impressão do reservatório (SolidWorks).....	65
Figura 5. 13 Modelo CAD do reservatório no Cura	67
Figura 5. 14 Impressão do reservatório	67
Figura 5. 15 Ponto de medição de deslocamento radial	69
Figura 5. 16 Condições fronteira aplicadas ao reservatório em SolidWorks e Solid Edge.....	69
Figura 5. 17 Aplicação de pressão interna na simulação em Nastran.....	70
Figura 5. 18 Montagem experimental para o ensaio de subcomponente	72
Figura 5. 19 Representação gráfica dos valores de deslocamento do ponto de medição	73
Figura 5. 20 Dimensionamento com recurso ao cabide existente	75
Figura 5. 21 Introdução do reforço no cabide.....	75
Figura 5. 22 Processamento do modelo CAD do cabide no Cura	76
Figura 5. 23 Pormenor do infill do cabide no Cura a 50%	77
Figura 5. 24 Localização do ponto de medição e de aplicação de forças no cabide	78
Figura 5. 25 Condições fronteira nas simulações do cabide em SolidWorks e Solid Edge	79
Figura 5. 26 Malha utilizada na simulação do cabide em SolidWorks	79
Figura 5. 27 Montagem experimental para o ensaio de componente.....	82
Figura 5. 28 Gráfico dos valores de deslocamento máximo para o ponto de medição, experimentais e das simulações	84
Figura 6. 1 Série de provetes -45°/45° e 0°/90° traccionados	85
Figura 6. 2 Fractura do provete 1 da série 0°/90°	86
Figura 6. 3 Pormenores da zona de fractura dos provetes 1 e 5 da série 0°/90°	86
Figura 6. 4 Gráfico de cruvas tensão/extensão dos provetes de ambas as série.....	88
Figura 6. 5 Tendência de valores experimentais e das simulações para o deslocamento do ponto de medição do reservatório	89
Figura 6. 6 Tentativas de impressão do cabide em várias posições	91
Figura 6. 7 Pormenor da distorção da peça devida à falta de aderência do material à plataforma	91
Figura 6. 8 Visível deflexão do cabido sob diferentes cargas (2N e 19N).....	92

Índice de Tabelas

Tabela 2. 1 Normas de possível uso no teste de materiais processados por impressão 3D (adaptado de Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer materials).....	15
Tabela 3. 1 Semelhanças entre polímeros processados por impressão 3D e materiais compósitos de matriz polimérica.....	29
Tabela 4. 1 Propriedades pré-definidas para o Nylon-6 (adaptado de matweb.com)	40
Tabela 5. 1 Conjunto de parâmetros de impressão I, II e III	56
Tabela 5. 2 Conjunto de parâmetros de impressão IV e V	57
Tabela 5. 3 Conjunto de parâmetros de impressão VI e VII.....	57
Tabela 5. 4 Medições de toleranciamento dos provetes da série -45°/45°	59
Tabela 5. 5 Medições de toleranciamento dos provetes da série 0°/90°	59
Tabela 5. 6 Resultados experimentais para os valores do módulo de Young para as duas séries de provetes	64
Tabela 5. 7 Caracterização do material na simulação (SolidWorks)	68
Tabela 5. 8 Caracterização do material na simulação (Solid Edge).....	69
Tabela 5. 9 Valores para o deslocamento radial do ponto de medição do reservatório nas simulações	71
Tabela 5. 10 Valores experimentais para o deslocamento radial no ponto de medição.....	72
Tabela 5. 11 Valores dos deslocamentos verticais obtidos nas simulações para o ponto de medição	80
Tabela 5. 12 Valores de força para os pesos utilizados no ensaio de componente	81
Tabela 5. 13 Combinação de pesos utilizada no ensaio de componente.....	82
Tabela 5. 14 Valores para o deslocamento e recuperação do ponto de medição no ensaio experimental	83
Tabela 6. 1 Cálculo de erros relativos dos valores das simulações para o deslocamento do ponto de medição	92

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O processo de manufatura por impressão 3D (ou fabrico aditivo) é uma tecnologia recente que, nos últimos anos, tem vindo a mostrar um crescente potencial para aplicações industriais. O seu funcionamento baseia-se, de um modo geral, na deposição de material de maneira iterativa, de acordo com a divisão de um modelo CAD em secções transversais (*slices*), que resultam na reprodução total desse mesmo modelo.

Como muitas das tecnologias nascidas na segunda metade do século XX, o processo de maturação da tecnologia de impressão 3D, até ao seu estado atual, levou apenas algumas décadas, um período de tempo relativamente pequeno e conveniente quando a visibilidade da tecnologia é um fator a considerar. Em *Sunpreet et al., 2016* aponta-se também a capacidade de se recorrer a impressão 3D como método de obter peças finais funcionais como um dos fatores que mais contribuiu para a massificação da impressão 3D. Como consequência, muitas das entidades que acompanham o processo do início, quer ao nível de companhias quer ao de criadores da tecnologia, ainda se mantêm ativos e relevantes. A indústria teve a oportunidade de acompanhar o processo de crescimento da impressão 3D e, recentemente, a evolução da técnica tem vindo a demonstrar elevado potencial de aplicação em vários tipos de indústria. O estado atual dos processos de impressão 3D deixam algo claro: a existência de uma nova tecnologia capaz de processar cada vez mais materiais metálicos, poliméricos, compósitos e até cerâmicos (*Gosselin et al., 2016*) em peças cada vez maiores, mais resilientes e de desempenho cada vez melhor.

É seguro dizer que as capacidades atuais da impressão 3D já vão além da prototipagem, os seus propósito e nome originais (“prototipagem rápida”), sem nunca deixar de ser útil nesta área. Os princípios que governam esta tecnologia (fabrico aditivo) não são afetados por muitas das restrições de que sofrem outros tipos de manufatura e maquinaria. Quase por definição, a impressão 3D, quando projetada de maneira adequada, não é limitada pela complexidade da geometria da peça nem por outros pormenores. *Boschetto et al. 2010* relacionam a vantagem de enfrentar a complexidade em impressão 3D com as necessidades crescentes das indústrias de produção em fabricar cada vez mais segundo as exigências de clientes no menor tempo possível. Elementos como furos, cortes, saliências são adicionados à peça durante a sua criação e não são dependentes de técnicas acessórias. A necessidade de soldaduras ou outro método de junção dentro da peça projetada é inexistente. Contudo, apesar das vantagens e diferenças entre esta técnica e outras, o seu caminho para o uso massificado terá de ser sempre acompanhado pela

comparação constante com as técnicas de manufatura e maquinação mais utilizadas e de provas dadas, sem serem esquecidas a sustentabilidade e impacto ambiental do processo (Priarone et al., 2017).

A impressão 3D, nos últimos anos, fez com sucesso a transição de um assunto de interesse exclusivo para a investigação académica e o uso recreativo para um negócio milionário, com empresas competidoras de projeção a nível mundial. Isto justifica o interesse de cada vez mais “grandes empresas” e universidades pelo mundo inteiro (Nickels, 2016). Os princípios tecnológicos regentes fazem desta técnica uma área interdisciplinar devido à sua adaptabilidade. A indústria aeronáutica está já empenhada na exploração dos possíveis benefícios que a impressão 3D pode traduz à produção nesta área, sendo já das principais atrações em exposições da tecnologia inerente a esta indústria (Brookes, 2015). A “bio-impressão 3D” e a impressão 3D a gravidade zero, por exemplo, são já uma realidade, demonstrando a possibilidade de investigação num número de áreas tão vasto quanto diverso.

Neste contexto, torna-se importante mencionar que, contrastando com muitas das tecnologias de ponta existentes, a impressão 3D não é de acesso exclusivo a entidades ou empresas especializadas. Um dos fatores chave responsáveis pela visibilidade mundial desta tecnologia é a existência de uma componente recreativa e amadora da impressão 3D. Graças ao modelo de negócio criado por companhias como a *MakerBot* e a *RepRap*, existem impressoras 3D acessíveis a todos e de crescente precisão e desempenho, similarmente com o que aconteceu com os computadores pessoais. O conhecimento adquirido e divulgado pelos utilizadores amadores desta técnica contribui em grande parte para o conhecimento empírico que hoje em dia existe sobre a técnica e para o seu melhoramento.

Os métodos de impressão 3D disponíveis são consideravelmente variados, tal como o espectro de materiais possíveis de serem processados por esta tecnologia, partilhando, contudo, os vários passos que definem a própria tecnologia, como evidenciado em Petrovic et al., 2009 na seguinte citação:

“O processo de fabrico consiste em dois passos básicos: revestimento e fusão. No processo de revestimento o material é depositado na superfície de trabalho formando uma camada muito fina. (...). A fusão refere-se ao processo de impressão do componente, camada-a-camada, sob a ação de uma fonte de energia.”

Entre outros, métodos como SLS (*selective laser sintering*) e DED (*directed energy deposition*) conseguem processar materiais metálicos e compósitos através da ação de lasers de potência adequada, enquanto que métodos como a extrusão de polímero (comummente referidos como FDM, *fused deposition modeling*, termo implementado pela empresa *Stratasys*) e a

estereolitografia processam polímeros por ação de gradientes térmicos e raios UV, respetivamente. Enquanto que estes quatro métodos de processamento pouco têm em comum nas suas realizações mais recentes, os princípios base da impressão 3D verificam-se em todos: a construção de peças completas pela deposição de material progressiva, camada a camada (*slice a slice*), de acordo com o modelo gerado em computador.

Parte das inovações oferecidas pela impressão 3D vem dos seus princípios de funcionamento inerentes que só podem ser comparados aos das técnicas de manufatura subtrativa existentes como o CNC e o corte a laser (*Berman, 2011*), ambas tecnologias onde a customização do produto final é dos principais objetivos. A adaptação da tecnologia à indústria e vice-versa está ainda a dar os seus passos iniciais. Para que se torne verdadeiramente eficaz num contexto industrial terá que ultrapassar as muitas barreiras que ainda existem para a sua implementação. A falta de normas e as carências que ainda se fazem sentir em relação à caracterização dos materiais e processos antes, durante e após a impressão são assuntos que requerem a atenção de todas as entidades envolvidas. É neste contexto que surge a presente tese de mestrado.

O trabalho desenvolvido e patente no presente relatório tem como objetivo a análise dos problemas da impressão 3D atual e das barreiras que tem que ultrapassar. É feita uma análise do estado da arte da técnica e dos seus principais problemas relativos a questões de medição dimensional e de resistência mecânica. Uma das questões a tratar prende-se com o ciclo de vida do material processado por impressão 3D e com a carência de informação desconhecida e necessária relativa às suas propriedades, comportamento estrutural e desempenho. Para a análise metódica e consistente desta questão, é sugerido o tratamento da implementação de um dado material processado por impressão 3D numa situação de projeto segundo o método de *building blocks*, cuja versão para o tratamento de materiais compósitos de matriz polimérica foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA. Este método baseia-se numa escala de testes de complexidade crescente, aliada a todos os métodos de análise pertinentes para a análise do comportamento e propriedades do material.

1.2 Objetivos

O trabalho desenvolvido na presente tese teve como principal objetivo a elaboração de uma proposta de método de testes para materiais processados por impressão 3D por extrusão de polímero. Foi primeiramente feita uma compilação de conhecimento sobre o estado de arte da impressão 3D e as principais barreiras científicas a ultrapassar para a sua implementação a nível industrial. A sugestão do uso do método de *building blocks* no tratamento de materiais

processados por esta técnica foi mencionada brevemente num relatório do NIST (*National Institute for Standards and Technology*) para o nível de aferição de propriedades mecânicas do material. Neste relatório, a hipótese é analisada e expandida para mais níveis do método.

Consideram-se os principais objetivos desta tese de mestrado:

- A definição das principais barreiras na caracterização das propriedades mecânicas e propriedades estruturais de polímeros processados por impressão 3D por extrusão de polímero.
- A definição das principais técnicas e dificuldades na parametrização de impressão 3D no contexto de projeto mecânico através de casos experimentais.
- O estudo da estrutura, filosofia e aplicabilidade do método de *building blocks* como método de testes de materiais processados por impressão 3D.
- O uso do Nylon-6 como caso de estudo na caracterização de polímeros processados por impressão 3D.
- A aplicação do método de *building blocks* para a caracterização do Nylon-6 processado por impressão 3D com recurso a três tipos diferentes de ensaios experimentais.

Para além da consulta de artigos científicos e académicos sobre a temática, foram também utilizados como bibliografia desta tese de mestrado informação disponibilizada por agentes no negócio de impressão 3D e, muito particularmente, relatórios e publicações de organizações internacionais científicas de grande importância na normalização de tecnologias como o já mencionado NIST, o Dep. de Defesa dos EUA, a FDA (*Foods and Drugs Administration*, EUA), a ISO (*International Standards Organization*) e a ASME (*American Society of Mechanical Engineers*).

1.3 Resumo dos princípios tecnológicos da extrusão de polímero

O tipo de impressão 3D estudado neste relatório é a impressão 3D por extrusão de polímero. Este tipo de impressão é de longe o mais massificado, sendo muitas vezes utilizado o termo geral “impressão 3D” para se referir a esta tecnologia em particular (*Dul et al., 2015*). Isto deve-se ao baixo custo que implica, comparativamente aos outros métodos de impressão 3D, e ao tamanho relativamente pequeno das impressoras. Em *Leon et al., 2016* afirma-se que enquanto a resolução possível de obter através da extrusão de polímero está restringida pelo diâmetro do extrusor, a simplicidade relativa do mecanismo inerente a esta técnica fazem dela das mais eficientes a nível de custos.

Os primeiros passos de uma impressão através desta técnica são comuns aos de todas as outras técnicas de impressão. A geração de um modelo CAD da peça a imprimir pode ser feita com recurso a um scanner 3D, se se pretender reproduzir uma peça já existente o mais fielmente possível; contudo, na maior parte dos casos o modelo é concebido pelo projetista num programa computacional de modelação tridimensional (CAD 3D). Para conseguir ser processado, o modelo CAD necessita ser convertido para um tipo de ficheiro universal para ser lido pelo *slicer*, sendo que o tipo de ficheiro de uso mais generalizado é o formato “.stl”, de *stereolithography*.

O modelo no formato adequado necessita ser processado e ajustado para a impressão com recurso a um programa computacional de interface com a impressora, ou *slicer*. É nestes programas que é preparada a impressão. O posicionamento da peça durante a impressão, a resolução da mesma (i.e., a espessura das camadas de material que compõem a peça) e a definição da grande maioria dos parâmetros de impressão são feitos nesta etapa. Muitos dos softwares disponíveis possuem parametrizações pré-definidas para o tratamento de certos materiais em certas impressoras; a utilidade desta pré-definições é contudo relativa devido à enorme variabilidade de materiais e impressoras disponíveis para a maioria dos tipos de impressão 3D. É dever do projetista regular tais parâmetros de maneira que a impressão resulte em peças satisfatórias. São também fornecidos no *slicer* estimativas de tempo de impressão e de gastos de material (e, em alguns casos, o custo financeiro de cada impressão, se forem fornecidos os valores monetários do material utilizados). Esta etapa de pré-processamento culmina na conversão de toda a informação relativa à peça e aos parâmetros de impressão num ficheiro de nome GCode, capaz de ser lido pela própria impressora.

A impressão 3D por extrusão de polímero processa somente material sob a forma de filamento. O diâmetro do filamento varia consoante o produto mas encontra-se normalizado na maioria dos casos, tendo que ser adquirido consoante as características da impressora a utilizar. O filamento é adquirido em formato de bobina e alimentado aos componentes móveis da impressora por ação de engrenagens. A velocidade segundo a qual se dá alimentação de filamento depende da velocidade de impressão pré-definida, devendo ser ajustada consoante o tempo disponível de impressão e, sobretudo, de acordo com as características do material, sendo o tempo de solidificação do material depositado dos parâmetros mais condicionantes do sucesso da impressão. O filamento é então aquecido no extrusor à temperatura de impressão definida. O material amolecido ou liquefeito é então extrudido pela ponta quente (“*hotend*”) do extrusor e depositado de acordo com a geometria de cada secção transversal (*slice*) definida no código de fabrico.

A parte móvel da impressora deposita iterativamente (*slice* em *slice*) o material do filamento de acordo com os contornos e preenchimento da peça na horizontal, parando e

retomando o fluxo de material quando necessário. Após a conclusão de cada camada (*slice*) o cabeçote da impressora ascende ou a plataforma de impressão descende uma distância igual à resolução escolhida para cada impressão (Figura 1.1).

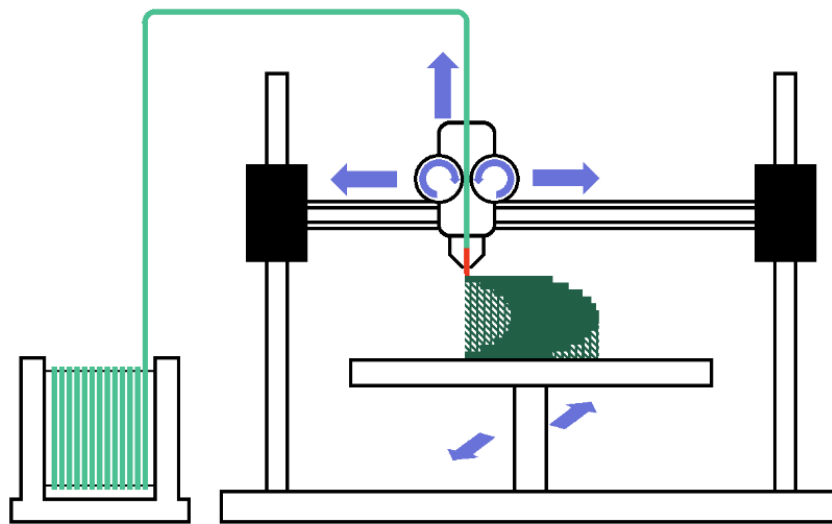


Figura 1. 1 Esquema do funcionamento de uma impressora de extrusão de polímero

Todo o mecanismo de uma impressora de extrusão de polímero está configurado de modo a que o cabeçote se possa mover em dois ou três eixos a velocidades variáveis, sendo que é a distância na qual o cabeçote se pode mover que define o tamanho máximo da peça possível de ser impressa. Isto faz com que este método de impressão 3D seja particularmente suscetível à estabilidade da impressora, necessitando a impressora de uma calibração conveniente deste aspeto para que os resultados sejam satisfatórios.

O material extrudido sofre alterações no processo de impressão devidas ao grande conjunto de variáveis em jogo. As modificações das propriedades mecânicas, químicas e físicas devem-se, em parte, aos gradientes térmicos a que o material é sujeito durante a extrusão e ao seu processo de solidificação, aliado à velocidade com que é depositado, conferem características ao material que podem variar de outras impressões em que o mesmo material é utilizado na mesma impressora mas com parametrizações diferentes. A dificuldade de medir e prever as alterações que o material sofre durante o processo de impressão tem como consequência a incapacidade de prever as características estruturais da peça final. Tal é bastante prejudicial numa situação de projeto quando é necessário saber qual o comportamento da peça quando sujeita às solicitações e

outras componentes características das suas condições de serviço. Este é um dos aspetos a melhorar para que a aplicação deste método num contexto industrial seja feita de maneira adequada e com confiança nos resultados.

1.4 Estrutura

O presente relatório de tese está estruturado de maneira lógica, de modo a que seja primeiro exposto o resumo do conhecimento aglomerado sobre o estado da arte em impressão 3D e dos seus principais problemas, seguido da descrição do método que se conjectura poder fazer parte da solução para tais problemas. Seguidamente são expostos os ensaios experimentais utilizados como prova de conceito da aplicação de tal método, a análise desses resultados e finalmente são apresentadas as conclusões da tese.

Os principais problemas na caracterização dos materiais e processos relativos à impressão 3D são expostos no segundo capítulo. É feita a análise de tais problemas e das suas consequências com alusões ao que a sua solução traria de benéfico para o processo. São também mencionadas as normas que se pensa poderem ser utilizadas na supramencionada caracterização do material.

O método de *building blocks* é descrito no capítulo 3, onde são analisadas a sua utilidade e filosofia. São definidos o tipo de testes abrangidos pelo método, o seu propósito e o tipo de características que analisam. É neste capítulo que é gerado o caso de estudo para a adaptação do método à realidade da impressão 3D e são integrados os ensaios experimentais projetados nos blocos do método.

O capítulo 4 debruça-se sobre o material utilizado e nele é caracterizado o filamento de Nylon 6 utilizado nos ensaios experimentais. A estrutura química do Nylon-6 é resumidamente explicada e são feitas considerações sobre a informação disponibilizada pelo fabricante. Neste capítulo estão também presentes as tabelas de valores de propriedades mecânicas pré-definidas, retiradas da plataforma online *MatWeb*, utilizadas no dimensionamento dos provetes a utilizar nos ensaios.

Os ensaios experimentais executados para a presente tese de mestrado são descritos no capítulo 5. É descrito pormenorizadamente o processo de impressão dos provetes de teste e as principais considerações tidas na parametrização das impressões. O procedimento experimental e as simulações computacionais efetuadas através do Método dos Elementos Finitos são também descritos neste capítulo.

A análise de resultados de cada ensaio experimental e a sua ligação são analisados no capítulo 6. São estudados e comparados os resultados experimentais dos ensaios e das simulações computacionais, à luz do método de *building blocks*.

Por fim, no último capítulo, são descritas as conclusões retiradas de todo o trabalho realizado na tese, e são feitas considerações sobre trabalhos futuros nesta área.

2 Medição e Impressão 3D

2.1 Caracterização do material

A caracterização do material utilizado em impressão 3D, antes, durante e após o processo, é de importância vital na aplicação deste método de manufatura num contexto industrial. No guia de diretrizes tecnológicas para peças fabricadas por impressão 3D da FDA estado-unidense, é referido que “*os aspetos únicos do fabrico aditivo, como a deposição camada-a-camada, (...) traduzem-se em desafios na determinação da caracterização ótima e nos métodos de análise da peça impressa*”. Com efeito, uma caracterização adequada do material utilizado em impressão 3D leva à repetição de propriedades definidas entre peças do mesmo material, facilitando assim a definição de variáveis do processo e ajudando à caracterização global do material utilizado. Atualmente, a caracterização do material utilizado em impressões por extrusão de polímero é prejudicada por fatores característicos de uma tecnologia tão recente e complexa a níveis de variáveis em jogo, como é o caso da impressão 3D.

Considera-se importante destacar o valor que a publicação do NIST *Measurement Science Roadmap for Polymer-Based Additive Manufacturing* (Pellegrino et. Al, 2016) teve neste capítulo. Esta fonte bibliográfica consiste num compendio de informação sobre as dificuldades atuais na medição do processo de impressão 3D que resultou da conferência *Roadmap Workshop on Measurement Science for Polymer-Based Additive Manufacturing* que decorreu em 2016 e onde vários painéis de especialistas de áreas de interesse no ramo da impressão 3D deram a sua contribuição para realçar os problemas e metas a atingir nesta matéria.

O elevado número de variáveis em jogo durante o processamento do material por impressão 3D torna necessária a existência de ferramentas de previsão que façam a correlação entre as propriedades originais e finais do material utilizado, evidenciando as alterações induzidas pelo processamento. Serão necessárias, para a caracterização do material a este nível, não só a agregação do conhecimento disponível e validado sobre as características e propriedades do material, como o desenvolvimento de técnicas de previsão que descrevam adequadamente o processo e analisem a transmissibilidade de tais propriedades de matéria-prima para produto final. Em impressão por extrusão de polímero, é necessária uma definição bem estabelecida das propriedades físicas, químicas, térmicas e mecânicas para que o impacto do processo seja analisado aos níveis macro- e microscópico. Os problemas na caracterização do material antes e após a impressão são contudo transversais a todas as técnicas de impressão 3D; em *Stichel et. Al, 2016*, por exemplo, evidenciam-se as dificuldades e importância da caracterização do material no

processo de SLS, sendo que para esta tecnologia a reorganização dos grãos de pó (formato de material com que esta tecnologia trabalha) na peça final induz fenómenos de porosidade, cujo aparecimento e influência nas propriedades mecânicas ainda não está devidamente estudada.

A caracterização do material neste contexto é dificultada pela falta de normalização desenvolvida para este processo de fabrico. Durante o projeto de peças impressas, tal falta de normalização é notada em primeira instância na relação com o fornecedor, sob a forma da falta de controlo da informação relativa às propriedades dos materiais que comercializam as empresas que são fornecedoras dos filamentos e impressoras. De facto, não existem nem qualquer obrigatoriedade em fornecer este tipo de informação ao consumidor nem alguma entidade que confirme a veracidade dessa informação. Tendo em conta que o processo de fabrico do filamento é controlado exclusivamente pelas empresas que o fabricam e pelos seus fornecedores, dados relativos às propriedades do material e indicações para a impressão podem ser ou não fornecidos e não ser corretos. As propriedades dos materiais, aquando do fabrico do filamento, podem sofrer alterações não evidenciadas nem explicitadas ao consumidor devido à falta de controlo de qualidade por uma entidade reguladora. As empresas fornecedoras de material para impressão 3D, tendem a desresponsabilizar-se de todas as desilusões que possam surgir do mau desempenho do material, tendo em conta o esperado, ficando o consumidor sem garantias nenhuma relativamente ao que compra. Este tipo de relação é também danoso na análise da cadeia de fornecimento no contexto de implementação de impressão 3D num meio industrial, como é evidenciado em *Schniederjans, 2016*, onde tal implementação é analisada do ponto de vista económico.

São também relativamente inexistentes normas transversais para testes de propriedades do material e do seu processamento. Como exemplo, em *Otero et al., 2017* menciona-se a dificuldade em validar a limpeza da peça impressa por extrusão de polímero quando utilizada na indústria médica, devido a possíveis porosidades e à existência de suportes. Esta barreira deve-se em parte à novidade da técnica de impressão 3D mas também à inexistência atual de materiais para análise, cuja informação técnica seja de qualidade suficiente para o desenvolvimento de pesquisa académica e técnicas de teste que possam ser generalizadas às propriedades de todos os materiais processados desta maneira.

Grande parte dos problemas associados à caracterização do material pode ser mitigada com a construção de bases de dados relativas à caracterização dos materiais e do processo, nas quais a informação existente sobre os comportamentos dos materiais e as transformações que sofrem durante o processo seja agregada, em conjunto com informação nova que seja adquirida em esforços futuros de exploração da técnica. A partilha e utilização da informação existente contribui para o aumento do valor estatístico de toda a base de dados, tornando-a numa ferramenta

de projeto aplicável na previsão das propriedades da peça final, através do esforço conjunto de todas as entidades interessadas no melhoramento da técnica.

Em suma, a caracterização adequada do material é de importância extrema em todos os passos do processo. Os fatores que mais podem contribuir para o desenvolvimento futuro da impressão 3D neste aspeto passam não só pela agregação e partilha de conhecimento em repositórios de acesso geral, como pelo desenvolvimento e massificação de métodos de teste e de normas que determinem as propriedades do material extensivamente e que validem a sua transmissibilidade. A boa definição de tais parâmetros leva ao desenvolvimento de técnicas de previsão cada vez mais refinadas e ajustadas à realidade do processo, que por sua vez leva a metodologias de análise específicas à impressão 3D e às peças finais que produz. Neste caminho, terão também que ser mudadas certo tipo de ações por parte dos fornecedores, com o objetivo de que a qualidade do material seja garantida e verificada e de que as propriedades do material sejam as expectáveis no seu ciclo de vida, desde o filamento até à peça final.

2.2 Modelação e medição do processo

Para além da já mencionada dificuldade de caracterização de material, a qualidade do produto final produzido por impressão 3D está também dependente da enorme quantidade de variáveis que estão em jogo durante o processo de fabrico. A complexidade de interações de tal número de variáveis, aliadas à existência recente da técnica, leva a que seja necessária a criação de modelos de previsão do processo para a projeção segura do resultado final. Com efeito, a evolução da impressão 3D está condicionada pela capacidade que as tecnologias digitais acessórias necessárias têm para acompanhar o processo (*Baker, 2014*).

Uma melhor compreensão do processo e da sua interação com as propriedades do material e da estrutura da peça possibilitará a previsão das características da última, consoante o material e o método escolhido. A modelação ideal do processo tem em conta todas as propriedades mecânicas do material, bem como os característicos ciclos térmicos inerentes ao processo. No futuro, o projetista deve ser capaz de recorrer ao método de impressão 3D numa situação de projeto com apenas o mínimo de preocupação com as alterações inesperadas de acontecerem durante o processo, se a modelação do mesmo for feita de maneira mais fiel possível.

A estrutura laminar das peças produzidas requer particular atenção tendo em conta a anisotropia que confere à peça e as suas consequências. Será necessário caracterizar completamente as questões estruturais que advêm das interfaces entre camadas do material. A modelação deste aspeto, geral a quase todos os métodos de impressão 3D mas muito particular a

esta técnica, requer não só a análise estrutural desta característica de acordo com as solicitações do produto final, mas também a investigação a nível molecular do processo. Os modelos desenvolvidos para a análise de impressão 3D terão por isso que ter em conta esta característica da criação das peças e da sua interação com as propriedades do material em si.

A falta de normas para a validação e testes das peças processadas também se faz sentir neste aspeto, visto que a pesquisa e desenvolvimento de tais normas terão de ser feitos com recurso a modelos de previsão, também eles certificados. Uma vez implementados modelos de previsão que reproduzam fielmente o processo, os protocolos de validação e a certificação da própria tecnologia torna-se muito mais rápida. Para este fim, é necessário que o conjunto de características a avaliar seja definido, tendo em conta a análise do papel de cada uma no processo. Idealmente, os modelos computacionais do futuro conseguirão prever as propriedades do material na peça final através da computação dos dados do material no filamento e das características do projeto, que se manterão independentemente da configuração geométrica da peça. Em *Biranchi et al., 2016* é evidenciado um pormenor simples mas de elevada importância para esta temática: a conversão do modelo CAD num ficheiro “.stl” implica a aproximação das curvas do modelo em segmentos de reta pequenos, sendo que este facto contribui para desvios no toleranciamento dimensional da peça independentemente das alterações físicas que o material sofre no processo.

Ao nível do processo em si, verifica-se também a falta de tecnologias de monitorização para o controlo da impressão. Na atualidade, ainda não se regista a aplicação de qualquer tecnologia deste tipo no uso corrente de impressão 3D. A maioria de impressoras no mercado informa simplesmente o utilizador sobre os valores de alguns dos parâmetros de impressão que ele próprio definiu, não existindo qualquer sistema de controlo de qualidade durante a impressão. A carência de tecnologias de monitorização verifica-se também em outras tecnologias de impressão 3D. Em *Hagqvist et al., 2013* evidencia-se a dificuldade em caracterizar a morfologia das gotas de metal fundido no processo de DED (*directed energy deposition*) durante a deposição do material, sugerindo um método de controlo automático do processo através da medição da resistência elétrica do material *in situ*.

Existe, portanto, uma grande necessidade de tecnologias de medição que supervisionem todas as variáveis no processo de impressão 3D, e que as controlem de acordo com o definido pelo projetista. Será primeiro necessário definir quais as variáveis a monitorizar para assegurar a qualidade da peça. O desenvolvimento de tecnologias de sensores deve ser apontado para a medição de variáveis como os gradientes térmicos, composição química, densidade e resolução da peça durante o processo de impressão para que sejam tiradas conclusões sobre o papel de cada uma das variáveis na qualidade final da peça. Um controlo de variáveis durante o processo, aliado

a tecnologias de previsão e à caracterização correta do material, assegurará não só a repetibilidade de peças de qualidade igual como também das suas propriedades finais.

Uma monitorização adequada do processo de impressão permitirá ao projetista um controlo eficiente da qualidade da peça a ser fabricada, o que consequentemente possibilitará a compreensão do papel de cada variável e as escolhas e compromisso a fazer quando se pretende adquirir certas características do processo em detrimento de outras.

2.3 Normas para uso em impressão 3D

Como já foi referido, será necessário no futuro o desenvolvimento de normas que regulem a qualidade do processo de impressão 3D. Enquanto que já existem algumas normas relativas a esta técnica, nenhuma se foca inteiramente na uniformização dos testes de propriedades mecânicas de partes adquiridas por este método. Algumas das normas ISO e ASTM diretamente relacionadas com impressão 3D são seguidamente listadas:

- **ISO 17296-2:2015** *Additive manufacturing -- General principles -- Part 2: Overview of process categories and feedstock*
- **ISO 17296-3:2014** *Additive manufacturing -- General principles -- Part 3: Main characteristics and corresponding test methods*
- **ISO 17296-4:2014** *Additive manufacturing -- General principles -- Part 4: Overview of data processing*
- **ISO/ASTM 52900:2015** *Additive manufacturing -- General principles -- Terminology*
60.60
- **ISO/ASTM DIS 52901.2** *Additive manufacturing -- General principles -- Requirements for purchased AM parts*
- **ISO/ASTM NP 52902** *Additive manufacturing -- General principles -- Standard test artifacts*
- **ISO/ASTM DIS 52903-1** *Additive manufacturing -- Standard specification for material extrusion based additive manufacturing of plastic materials -- Part 1: Feedstock materials*
- **ISO/ASTM CD 52903-2** *Additive manufacturing -- Standard specification for material extrusion based additive manufacturing of plastic materials -- Part 2: Process -- Equipment*
- **ISO/ASTM NP 52905** *Additive manufacturing -- General principles -- Non-destructive testing of additive manufactured products*
- **ISO/ASTM DIS 52910.2** *Guidelines for additive manufacturing design*

- **ISO/NP TR 52912** *Design of functionally graded additive manufactured parts*
- **ISO/ASTM 52915:2016** *Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version*
- **ISO/ASTM 52921:2013** *Standard terminology for additive manufacturing -- Coordinate systems and test methodologies*

Adicionalmente, o subcomité F42 da ASTM (fundado em 2009) dedica-se à tecnologia de impressão 3D; contudo, apenas ainda publicou documentação sobre o teste de propriedades mecânicas relativas a materiais metálicos. A única norma que fornece diretivas de teste destas propriedades no contexto dos materiais plásticos é a ASTM F3091/F3019M-14 mas só considera peças obtidas por PBF. Outras normas respetivas a esta técnica, no domínio de materiais poliméricos, fazem referência a métodos de teste já existentes, mas nenhum específico à impressão 3D. Isto significa um grande entrave à evolução e implantação desta tecnologia, visto que um dos grandes medos associados às peças impressas é o da sua falta de qualidade quando comparadas com peças obtidas por outros métodos.

Face a esta falta de normas para o teste de propriedades mecânicas de peças obtidas por impressão 3D, o NIST, na sua publicação “Material Testing Standards for the Additive Manufacturing of Polymer Materials” analisou a aplicabilidade de algumas das normas já existentes para o teste de propriedades mecânicas à realidade da impressão 3D. A aplicabilidade à impressão 3D destas normas já existentes foi classificada de três maneiras: “SIM” se a norma for aplicável no contexto de impressão 3D sem alterações; “NÃO” se a norma exigir provetes que não podem ser fabricados por impressão 3D e “SIM COM ORIENTAÇÃO” se a norma for aplicável na sua generalidade, mas carecer de alterações e adaptações para ser aplicada no contexto de impressão 3D. No caso das normas classificadas como “SIM COM ORIENTAÇÃO” (“S.C.O.”), as considerações e modificações a fazer prendem-se com aspetos inerentes ao processo de fabrico por impressão 3D e servem para colmatar aspetos específicos deste processo. Tais alterações podem estar relacionadas com o toleranciamento geométrico e dimensional do provete de teste, o pós-processamento do provete para que este corresponda ao que é exigido pela norma, a anisotropia inerente a grande parte dos métodos de impressão 3D e com considerações específicas em cada norma utilizada. O resultado obtido pelo NIST na avaliação de normas neste contexto é explicitado na seguinte tabela (Tabela 2.1) de forma resumida.

Tabela 2. 1 Normas de possível uso no teste de materiais processados por impressão 3D (adaptado de *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer materials*)

Tensão	ISO 527-2:2012	ASTM D638-10	ASTM D3039	ISO 527-4:1997	ISO 527-5:2009
	S.C.O.	S.C.O.	S.C.O.	S.C.O.	NÃO
Torção	ISO 458-1:1985				
	(Não revisto)				
Flexão	ISO 178:2010	ASTM D6272-10	ASTM D7264/D7261	ASTM D790-10	
	S.C.O.	S.C.O.	NÃO	S.C.O.	
Compressão	ISO 14126:1999	ASTM D695-10	ASTM D3410/3410M-03(2008)	ISO 604	
	NÃO	S.C.O.	NÃO	S.C.O.	
Corte	ISO 14129:1997	ASTM D3518/D3518M-13	ISO 14130:1997	ASTM D2344/D23404M-13	ISO 15310:199
	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	S.C.O.
	ASTM D4255/D4255M-01(2007)	ASTM D7078/D707	ASTM D3846-08		
	NÃO	NÃO	NÃO		
Fluência	ISO 899-1:2003	ISO 899-2:2003	ASTM D2990-09		
	S.C.O.	S.C.O.	S.C.O.		
Fadiga	ISO 13003:2003	ISO 15850:2014	ASTM D7774-12	ASTM D7791-12	ASTM D6115-97(2011)
	S.C.O.	S.C.O.	S.C.O.	S.C.O.	NÃO
Fratura	ISO 15024:2001	ASTM D5528-13	ISO 13586:2000	ISO 13586:200	ISO 29221:2014
	NÃO	NÃO	S.C.O.	S.C.O.	NÃO
	ASTM D6068-10				
	S.C.O.				
Impacto	ISO 179-1:2010	ISO 179-2:1997	ISO 180:2000	ASTM D256-10	ASTM D6110-10
	S.C.O.	S.C.O.	S.C.O.	S.C.O.	S.C.O.
Esmagamento	ISO 12815:2013	ISO 12817:2013	ASTM D953-10	ASTM D5961/D5961M-13	ASTM D6484/D6484M-14
	S.C.O.	NÃO	S.C.O.	S.C.O.	NÃO

No presente documento será analisada em particular a aplicabilidade da norma ISO 527-4:1997 na determinação de propriedades mecânicas de tração de provetes em Nylon-6. Esta norma será descrita pormenorizadamente no ensaio em que foi utilizada e a sua capacidade na avaliação de propriedades mecânicas neste contexto será comentada.

3 Metodologias de teste

Numa situação de projeto mecânico, é necessária uma vasta compreensão e informação do comportamento estrutural de um dado material, quando este é considerado para aplicação. Como já foi evidenciado em secções anteriores deste relatório, na atualidade, uma das principais barreiras a ultrapassar na aplicação industrial de materiais processados por impressão 3D é precisamente a dificuldade em caracterizar o material *a priori*, antes da sua possível aplicação.

A definição das propriedades mecânicas cuja caracterização é imprescindível em aplicações estruturais é de importância vital em engenharia, pois a adequação de um material a uma peça final só pode ser feita quando o material é devidamente classificado, quer relativamente às suas propriedades inerentes, quer ao seu comportamento face às solicitações específicas para um dado fim, sendo o último obviamente regido pelas primeiras. A aferição de tais propriedades, quando não conhecidas ou confirmadas num dado contexto, é feita com recurso tanto a métodos analíticos e de previsão quanto a testes projetados para a determinação de dados específicos do material e da peça. Dependendo da classificação estrutural da aplicação do material, o custo de um programa de testes com o escopo necessário pode ser proibitivo quando a abrangência estatística exigida é elevada, tendo em conta o elevado número de propriedades mecânicas a determinar.

Atualmente, qualquer programa de testes e, de um modo geral, qualquer situação de projeto mecânico, faz recurso às ferramentas de análise desenvolvidas em engenharia para a previsão do comportamento estrutural do material face à sua aplicação. As ferramentas de análise são, por isso, de elevada importância no contexto da projeção de uma peça com um dado material, não sendo, contudo, complexas o suficiente para a verificação do comportamento da peça tendo em conta todas as condições a que a peça final está sujeita. A atitude mais correta a ter numa situação de adoção de um material novo é abordar a dicotomia dos resultados dos métodos analíticos e dos testes de propriedades de uma maneira sinérgica, usando os métodos de análise para prever os resultados dos testes e usando os resultados dos testes para validar o método analítico utilizado, tudo isto associado a técnicas estatísticas adequadas.

É neste contexto que se explora uma metodologia de testes elaborada de modo a facilitar a introdução de novos materiais numa determinada indústria, desenvolvido no Manual de Materiais Compósitos do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América. O método em questão tem como objetivo a execução e repetição de testes de propriedades mecânicas de compósitos com matriz polimérica, para a elaboração de uma base estatística relevante e fiável, aliada à mitigação dos custos monetários, através da criação de vários tipos de testes que variam em complexidade e em número. Trata-se de um esquema em formato *building blocks* que fornece

uma escala de testes de acordo com a sua complexidade e as propriedades mecânicas que determinam. Este encadeamento de testes tem como objetivo a certificação da componente estrutural do material no contexto de projeto mecânico (*design considerations*), estando associado a todas as considerações de projeto a ter em conta relativamente à aplicação e ambiente a que a peça vai estar sujeita bem com às características conhecidas e custos associados ao material. A definição dos testes é feita recorrendo a todas as tecnologias e métodos de análise relevantes, quer ao nível das metodologias e estatísticas que permitem a obtenção de resultados, quer ao das tecnologias de processamento e de medição utilizadas em cada caso (Figura 3.1).

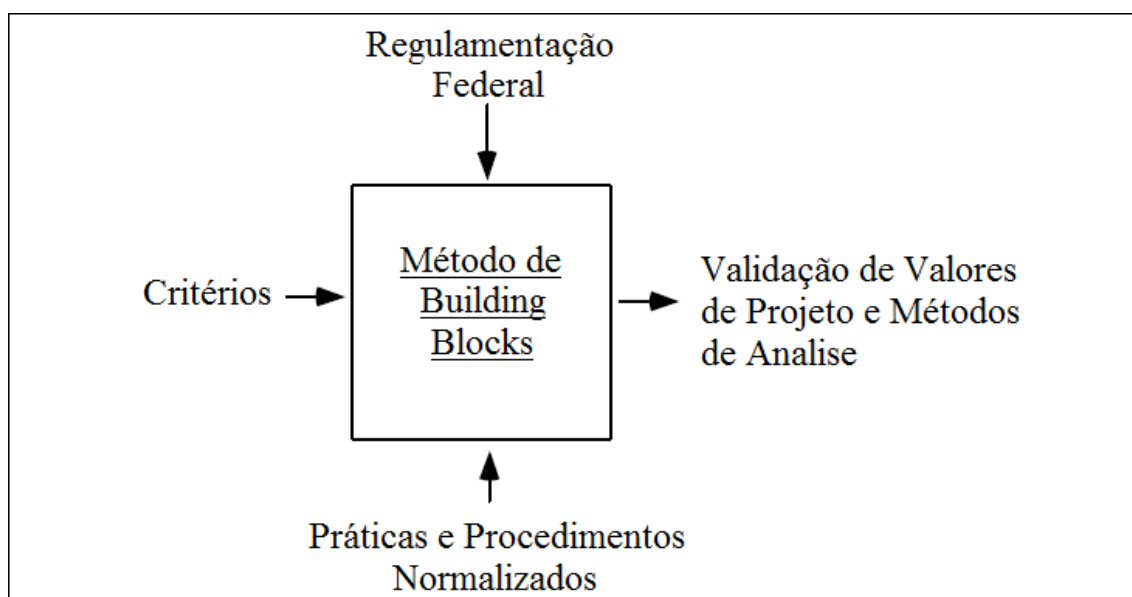


Figura 3. 1 Factores que influenciam o método de *building blocks* (Fonte: Manual de Materiais Compósitos, Dep. de Defesa dos EUA)

Neste capítulo do relatório, é feito um resumo da estrutura geral e da principal filosofia do método de testes por *building blocks*, o seu domínio e objetivos principais bem como o tipo e finalidade dos testes que envolve. Sendo um dos principais objetivos desta tese de mestrado a exploração deste método e da sua adaptabilidade ao processo de manufatura por impressão 3D, são delineadas as principais semelhanças entre as metodologias e tipos de teste dos materiais compósitos de matriz polimérica e dos materiais poliméricos processados por impressão 3D, através da comparação da realidade de propriedades mecânicas características de polímeros anisotrópicos. Os ensaios experimentais utilizados como prova de conceito desta premissa serão descritos nos capítulos seguintes, bem como as consequentes análises de resultados e conclusões.

3.1 Descrição geral do método de *building blocks*

Na sua essência, a planificação de testes para a introdução de um material, num dado contexto industrial, segundo o método patente no Manual de Materiais Compósitos do Dep. da

Defesa dos EUA, envolve a organização do conjunto de testes necessários para a certificação do uso de um material compósito de matriz polimérica para um determinado fim, de um modo que coordena os ensaios experimentais visados nos testes de medição de propriedades mecânicas do material e da peça, com os métodos analíticos necessários e com toda a informação disponível sobre as características do material. A complexidade dos testes aumenta em cada nível, ou bloco, juntamente com a especificidade da informação adquirida em relação à validação da utilização do material na peça.

O principal objetivo do método é o de tornar o processo de projeto mecânico mais eficiente, através da deteção de riscos tecnológicos o mais cedo possível no processo, diminuindo os custos e obstáculos, mas mantendo os critérios técnicos, regulatórios e comerciais. O principal fator contribuinte para a redução de custos passa por um maior número de testes de complexidade menor e, por conseguinte, mais baratos, reduzindo o número de testes mais complexos e caros necessários (Figura 3.2).

O esquema que pretende resumir de um modo mais geral a metodologia em estudo, está explicitado na seguinte figura, onde o plano de testes é coordenado com dois outros domínios.

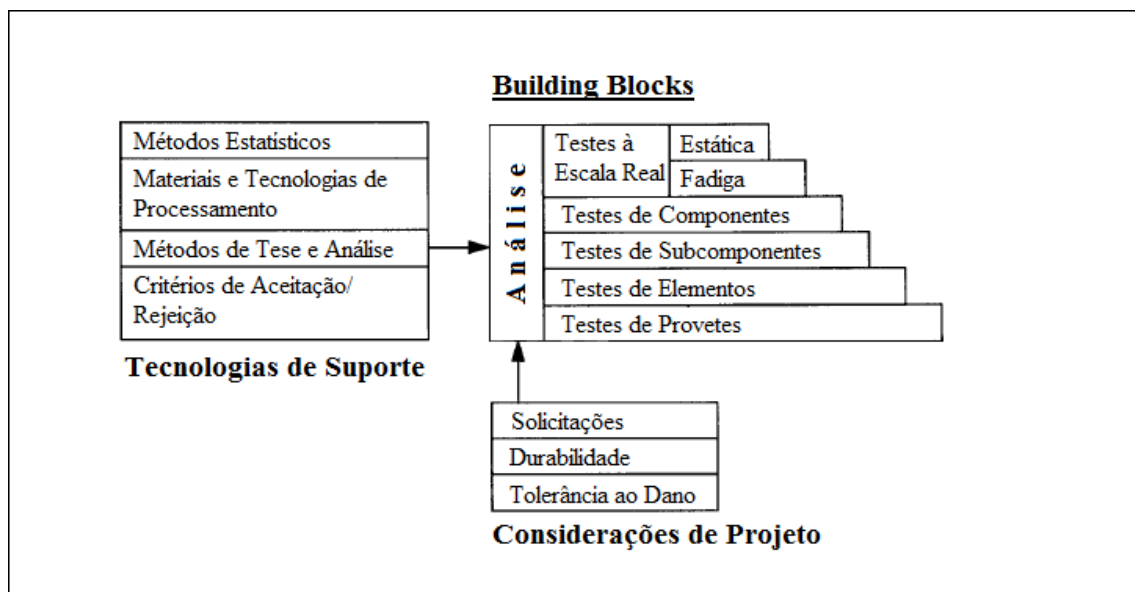


Figura 3. 2 Método de *building blocks* integrado numa situação de projeto (adaptado do Manual de Materiais Compósitos, Dep. de Defesa dos EUA)

O domínio das Considerações de Projeto (*Design Considerations*) encontra-se abaixo do método de *building blocks*, como antecedendo todo o plano de testes. Consideram-se como pertencentes a este domínio todas os dados tecnológicos e funcionais inerentes ao projeto. Todas as estimativas de cargas, funcionalidade e condições de serviço inerentes ao projeto da peça, bem como toda a informação que caracteriza o material relativa a propriedades mecânicas,

longevidade, considerações financeiras e sustentabilidade. Toda a informação relativa à validade do material, no contexto do projeto, tem de ser compilada para uma programação eficiente do plano de testes. Possíveis condições de falha devem ser analisadas e consideradas no nível adequado de complexidade de teste (bloco). Critérios de segurança devem ser definidos anteriormente ao início do programa de testes, para que sejam verificados adequadamente e o mais antecipadamente possível. Terão também que ser geradas as permissivas necessárias à definição adequada de cada teste, coordenadas com a informação desejada e a comparação com os métodos analíticos.

O domínio das Tecnologias de Suporte (*Supporting Technologies*), encontra-se à esquerda da organização dos testes em *building blocks* para simbolizar o acompanhamento constante do processo por parte destas tecnologias. As tecnologias aqui referidas são as necessárias para fazer a caracterização do material ao longo do processo, incluindo os métodos de teste e análise, os métodos de análise estatística, as tecnologias de processamento do material e os critérios de aceitação e rejeição que validam os resultados dos testes. Dentro das tecnologias de suporte disponíveis, terão que ser selecionadas as necessárias para a determinação das propriedades mecânicas do material, as normas de teste necessárias para avaliar determinadas propriedades do material, os métodos estatísticos para tratar a informação adquirida e todos os métodos de processamento e pós-processamento do material necessários, bem como a informação relevante em todas estas áreas. A definição dos testes presentes em cada bloco será feita com base nas tecnologias de suporte necessárias face às permissas definidas para cada teste. Está também inserida nesta categoria a informação fornecida sobre o material por parte do vendedor, sendo que a caracterização química e nível de qualidade do material deve ser analisada consoante as tecnologias de processamento utilizadas, tendo em conta a influência que as tecnologias de manufatura têm no desempenho mecânico do material.

O programa de testes coordenado com os métodos analíticos é evidenciado no domínio dos *Building Blocks*. A tipificação dos testes é feita consoante a forma que o material toma de acordo com cada teste. Os testes mais básicos determinam as propriedades mecânicas gerais do material utilizado sendo que a complexidade dos testes inseridos em cada bloco aumenta à medida que o propósito dos mesmos se aproxima das condições reais de funcionamento da peça em questão. O processo analisa assim de maneira cada vez mais específica o comportamento do material no contexto do projeto, culminando num ensaio à escala real do sistema em condições reais de serviço. Os testes de cada bloco baseiam-se em informação adquirida em testes de blocos anteriores, assegurando assim o encadeamento lógico dos níveis de teste. Nesta ordem, são determinados o comportamento do material isoladamente, o comportamento de todas as ligações, o desempenho de um número progressivamente maior de componentes em interação e, por fim,

o teste de todos os componentes em conjunto, sendo todos os modos de falha e verificação de critérios analisados em cada fase do processo. O Manual de Compósitos sumariza o processo de *building blocks* da seguinte maneira, traduzida e adaptada:

1. Gerar propriedades base do material e variáveis de projeto preliminares;
2. Baseado na análise do projeto, selecionar áreas críticas para subsequente verificação por teste;
3. Determinar os modos de falha crítica para cada parâmetro de projeto;
4. Selecionar o ambiente de teste que induz os determinados modos de falha crítica, com especial atenção aos modos de falha crítica característicos do material e do seu processamento;
5. Projetar as séries de testes de que simulem cada modo de falha e conjuntos de solicitações, realizando os testes e comparando os resultados com as previsões analíticas, fazendo as alterações necessárias aos métodos de análise;
6. Projetar e executar séries de teste cada vez mais complexas e em condições de carga mais abrangentes, testando vários modos de falha potenciais em simultâneo. Comparar com os métodos analíticos e fazer os ajustamentos necessários;
7. Projetar testes estáticos e de fadiga à escala real, incluindo fatores de compensação, para a validação final das cargas internas e da integridade estrutural. Comparar com o modelo analítico.

Com efeito, os níveis mais baixos do método testam provetes simples para a caracterização básica do material como propriedades mecânicas estáticas, sensibilidade geral ao entalhe, fatores ambientais e limites operacionais. Esta informação dará início ao processo de *building blocks* sendo o ponto de partida para as primeiras iterações de testes e verificação de condições de projeto. É nesta fase que são analisados os primeiros modos de falha e definidas as premissas para os blocos de testes subsequentes.

Os testes seguintes baseiam-se na informação obtida em testes anteriores para a identificação de novos modos de falha e áreas críticas. A progressão de testes evolui com o aumento da complexidade das cargas estáticas e de fadiga, sendo descobertos e contabilizados modos de falha desconhecidos. O programa de testes conclui com a simulação de todas as cargas, solicitações, modos de falha e deflexões de toda a estrutura, com a confirmação de que não surgiu nenhum modo de falha não previsto.

Tendo em conta a dependência que os testes de um determinado bloco têm dos resultados dos testes de blocos anteriores, o método implica um constante controlo de qualidade, para a verificação de que as propriedades do material já determinadas são mantidas. O historial de

processamento do objeto de um determinado teste deve ser o mesmo que o de provetes mais pequenos e menos complexos de testes de níveis inferiores, para assegurar a fiabilidade da informação já determinada. Neste aspeto, devem ser conduzidos ensaios não destrutivos e destrutivos (se necessário) para a aferição da qualidade do material.

De um modo geral, o tipo de testes de blocos inferiores e o seu significado estatístico encontra-se já bem documentado e normalizado pela existência de normas e estudos, devido à sua generalidade e aplicabilidade. Isto conduz a testes bem definidos de início e a avaliações de populações estatísticas já estabelecidas. À medida que o processo de testes vai progredindo de bloco para bloco e com o aumento da complexidade dos mesmos, o número de provetes testado em cada tipo de teste torna-se difícil de determinar, tendo que ser definido de acordo com outros aspetos como a experiência com o material, a criticidade estrutural da variável testada, questões económicas e decisões de engenharia. O tipo de testes a realizar em blocos superiores está também dependente do projeto em si e das características do material face às condições necessárias e cada vez mais específicas.

A coordenação dos testes em todos os blocos com as ferramentas analíticas de previsão é um dos principais aspetos a considerar no método de *building blocks*. Idealmente, os métodos de análise deveriam prever os resultados de um determinado bloco de testes com a informação adquirida em blocos anteriores. O elevado número de variáveis que caracterizam um material, aliado à possibilidade de ocorrerem defeitos não previstos, tornam a previsão completa e acertada do comportamento do material quase impossível. A computação de dados de testes de níveis inferiores nas metodologias de análise não pode, por isso, prever os resultados dos testes seguintes com acuidade total. Assumindo a transferência de propriedades de um bloco para um bloco superior, assegurada pelo controlo de qualidade, exige-se que cada teste tenha os seguintes requerimentos:

- Descobrir modos de falha que não tenham ocorrido em testes de blocos inferiores.
- Verificar ou modificar métodos de análise que já tenham sido verificados em testes de blocos inferiores.
- Permitir a inclusão de defeitos que podem variar de provete para provete.

Estes critérios foram definidos para que todo o plano de testes possa ser acompanhado pelo melhoramento e adequação dos métodos analíticos utilizados.

3.2 Tipos de teste

Nesta secção será abordada a subdivisão e tipificação de testes mais comum a utilizar no método de *building blocks*. Os tipos de teste evidenciados não têm uma definição geral, sendo cada um descrito neste contexto consoante os seus aspetos tecnológicos mais óbvios, o grau de complexidade relativo aos outros tipos de teste, a sua finalidade e tipo de informação que fornece e o seu enquadramento no planeamento geral do método.

Realça-se que a aplicação e recurso a todos os tipos de teste não é necessária em todas os casos de projeto em que se usa uma adaptação do método de *building blocks*. Previsões sobre o tipo de testes necessário devem ser feitas antes e durante o processo, visando a um planeamento adequado à situação e à redução de custos e riscos. Dependendo do grau de complexidade do objeto de estudo, a verificação e validação dos parâmetros de projeto pode ser feita com recurso a apenas alguns dos tipos de teste, havendo a necessidade de adequar a adaptação do método à realidade do projeto.

A descrição dos tipos de teste é feita de maneira cronológica e de complexidade crescente, mas o planeamento real e execução dos testes pode não ser feita de maneira tão ordeira. Existem várias condicionantes que podem fazer com que o planeamento de vários blocos de teste se sobreponha, estando vários tipos de teste de blocos de complexidade diferentes a ocorrer ao mesmo tempo. Questões como a descoberta de novos modos de falha ou a própria disponibilidade do equipamento podem condicionar o encadeamento dos testes, sendo, contudo, importante elaborar um planeamento em que se mantenha a organização lógica da passagem de resultados de testes de complexidade inferior para o de complexidade superior.

A figura 3.3 organiza os tipos de testes mais comuns em forma de pirâmide, dos menos complexos para os mais complexos.

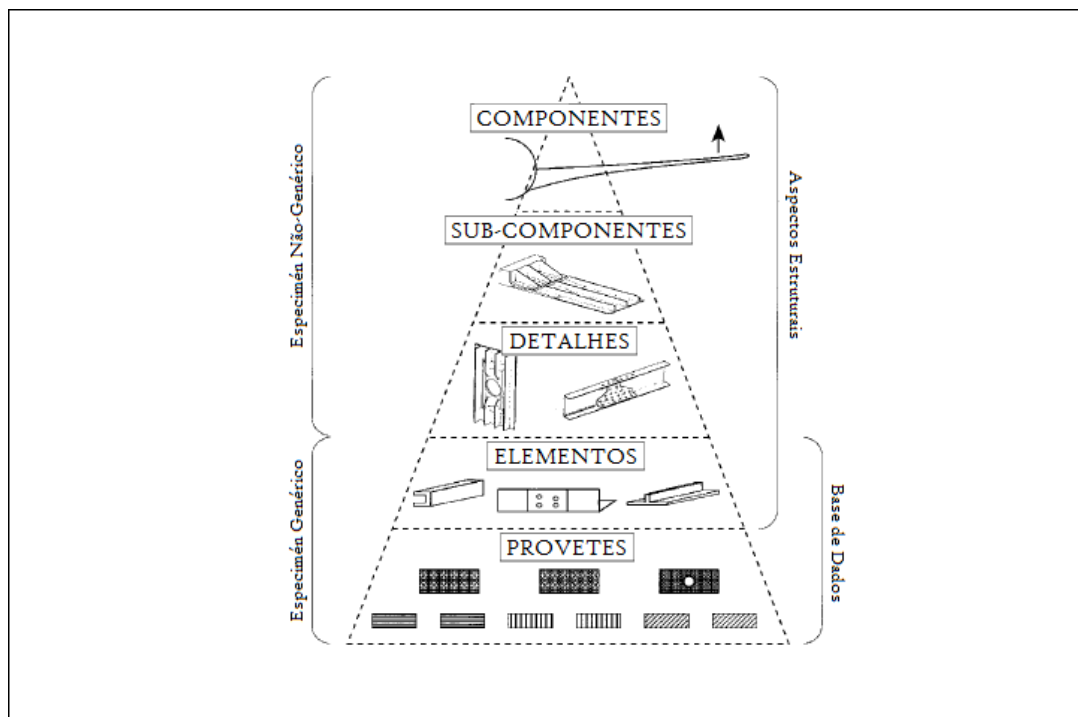


Figura 3. 3 Testes do método de *building blocks* e o tipo de informação que fornecem (adaptado do Manual de Materiais Compósitos, Dep. de Defesa dos EUA)

A organização dos tipos de teste evidenciada na pirâmide da figura acima é simplificada, tendo em conta que não explicita o objetivo de cada tipo de testes nem o tipo de informação adquirida. A sua escolha como ilustrativa do encadeamento de testes no método de *building blocks* foi feita por razões de generalização, visto que, como já foi referido, a tipificação e objetivo dos testes necessário muda de caso para caso.

Segundo a classificação à esquerda da pirâmide, os provetes e detalhes da base são considerados provetes de teste genéricos devido ao facto de o tipo de variáveis testadas terem valor universal para qualquer outro contexto em que o mesmo material seja usado. Já os testes de detalhes, subcomponente e componentes são, nos casos mais comuns, específicos a um determinado projeto e avaliam o comportamento do material em situações particulares tendo em contas as variáveis específicas do projeto, sendo considerados não genéricos.

A classificação do tipo de testes à direita da pirâmide diferencia a informação obtida nos vários tipos de teste como passível de ser integrada numa base de dados ou como descrevendo o comportamento de um fator estrutural. Esta divisão é feita com base na aplicabilidade dos resultados dos testes mais básicos noutros casos, tendo em conta que descrevem as propriedades mecânicas básicas do material e o seu comportamento em situações mais comuns, podendo assim ser armazenados em base de dados e ser utilizados em outros projetos. Os resultados dos restantes

tipos de teste descrevem o comportamento estrutural do objeto de teste em análise, sendo que estes testes são projetados de acordo com as especificidades do projeto.

Seguidamente, apresentam-se as definições mais pormenorizadas dos tipos de teste, e a seu principal papel à luz do método de *building blocks*:

- **Testes de provetes**

Os testes de provetes são o tipo de teste mais básico segundo o método de testes por *building blocks*, sendo o ponto de partida de todo o processo. Com recurso a estes testes são definidas as características mais básicas do material processado como as propriedades mecânicas estáticas (módulo de Young, tensão de cedência, etc.) e de fadiga, propriedades interlaminares, propriedades de adesão e durabilidade.

Esta é a primeira instância de teste das propriedades do material pelo que se assume que os valores determinados para tais propriedades se manterão nos testes seguintes. É através deste tipo de testes que devem ser definidos os efeitos que o tipo de processamento do material tem nas propriedades mecânicas do mesmo, através de uma abordagem científica às variáveis de processamento juntamente com as características do material.

Por serem testes com uma abrangência tão grande e de simplicidade reduzida, o número de provetes testados anda geralmente na ordem das centenas ou mesmo milhares, para assegurar a validade estatística dos resultados obtidos.

É também com recurso a estes testes que são definidas as premissas que vão criar e reger a classificação estrutural para os subcomponentes e componentes seguintes.

- **Testes de elementos**

Os testes de elementos analisam o comportamento estrutural do material em detalhes localizados, repetidos em toda a estrutura. Fazendo a transição do teste de provetes para o de subcomponentes, os testes de elementos devem ser a primeira instância em que os resultados pretendidos se devem subordinar à configuração estrutural da peça e não às características gerais do material, apesar de grande parte da informação adquirida ter aplicabilidade em outros projetos em que estejam presentes o mesmo tipo de elementos.

São comumente analisados neste tipo de testes elementos como ligações estruturais, furos, indentações, reforços e quaisquer outros tipos de elementos comuns. Similarmente aos testes de provetes, os testes de elementos são de grande importância no discernimento da influência do papel que o processamento do material tem nas suas propriedades, visto que é com

este tipo de testes que se começam a definir as capacidades estruturais do material no contexto do projeto. As cargas utilizadas neste tipo de testes são tipicamente uniaxiais.

A avaliação da ocorrência de possíveis defeitos também é geralmente feita nesta etapa do processo. Devem ser feitas análises do efeito de tais defeitos na componente estrutural do elemento e definidas especificações para o tipo de defeitos permitidos e as incertezas a eles associadas.

- **Testes de subcomponentes**

Tipicamente, os testes de subcomponentes emulam o comportamento de partes estruturais da peça, sendo em muitos casos ensaios a partes específicas de um componente.

Os tipos de solicitações simuladas nos testes de subcomponentes são consideravelmente mais complexos. É por isso que neste tipo de teste é avaliada a caracterização do material feita em blocos de testes inferiores. Os modelos analíticos baseados em resultados anteriores são confrontados neste tipo de testes e a complexidade estrutural da peça é avaliada.

O efeito de possíveis danos na peça é também avaliado em testes deste tipo, quer ao nível estático quer de fadiga. São avaliadas as redistribuições de carga em áreas de dano localizadas e a propagação de efeitos nas zonas danificadas, sendo consequentemente reformuladas as variáveis quando necessário e tiradas considerações sobre o efeito de tais danos no produto final. É também através deste tipo de testes que se analisa comumente o efeito da presença generalizada de certo tipo de elementos como, por exemplo, os reforços totais de determinadas secções da estrutura.

A este nível de testes, a informação adquirida já é quase completamente relativa à estrutura específica da peça e não às propriedades do material. Contudo, o papel de certos ambientes de serviço pode ainda ser avaliada à larga escala através deste tipo de testes.

- **Testes de componentes**

O teste de componentes envolve ensaios de provetes de configuração complexa e representativa de componentes estruturais da peça final. Sendo um dos níveis de teste mais avançados, são frequentemente avaliadas as metodologias de análise em toda a sua complexidade e consoante a totalidade das solicitações do componente. A capacidade de previsão dos modelos computacionais é comparada com a realidade. A avaliação destes métodos de análise é de importância acrescida no caso dos polímeros devido à imprevisibilidade característica de fatores como a sensibilidade ao entalhe, neste tipo de materiais.

Este tipo de testes é de elevado grau de complexidade, envolvendo em muitos casos um grande aparato de instrumentação e medição para que o elevado número de medições seja feito o mais precisamente possível. O custo deste tipo de testes pode ser proibitivo, sendo um dos principais objetivos do método de *building blocks* a afinação do processo de testes para que os resultados obtidos em tipos de teste inferiores (mais numerosos) reduzam o número de testes mais complexos ao estritamente necessário.

É também neste tipo de teste que são avaliadas as extensões e as deflexões dos componentes do material, aquando do seu serviço.

- **Testes à escala real**

O tipo de teste final no método de *building blocks* consiste na simulação da peça na sua totalidade e sujeita a todas as solicitações necessárias à funcionalidade do objeto.

Podem ser realizados para a verificação específica de modos de falha, das condições de serviço em vários ambientes ou em ambientes extremos. O modelo da peça é deste modo avaliado em todas as componentes, podendo a avaliação ser feita sobre as condições limite admissíveis ou de cedência nas situações visadas na criação do projeto.

Uma das principais utilidades deste tipo de testes é a verificação de que todos os modos de falha foram contabilizados, sendo que é bastante recorrente notarem-se modos de falha novos que não foram detetados em nenhum dos tipos de testes anteriores.

É também feita, através deste tipo de teste, a validação total dos métodos analíticos utilizados, bem como a sua capacidade de prever o escopo total do comportamento do material nas condições do projeto.

Sendo o tipo de testes mais complexo, é também o mais caro. Os ensaios à escala real devem ser muito bem planeados e os objetivos dos mesmos devem ser acordados entre todas as entidades envolvidas na conceção do projeto.

3.3 Pertinência e adaptação à realidade de impressão 3D e enquadramento na tese

Um dos principais objetivos desta tese de mestrado é analisar a adaptabilidade do método supradescrito, idealizado para o uso em compósitos de matriz polimérica, à realidade do processo

de fabrico por impressão 3D. Esta premissa teve origem nas semelhanças estruturais entre os dois tipos de processamento de materiais.

Enquanto que a organização de testes de qualificação de materiais em formato de *building blocks* pode ser feita para qualquer tipo de materiais, esta é particularmente útil no estudo de materiais compósitos. A anisotropia dos materiais compósitos torna-os muito suscetíveis a falhas provocadas por cargas descentradas e a tensões de corte em direções em que o material é mais frágil. Com efeito, a anisotropia dos materiais compósitos de matriz polimérica confere-lhes um comportamento de deformação que muda consoante a direção de aplicação da força. Estas características estruturais levam a que o tipo de material possa sofrer de múltiplos modos de falha, complicando a sua previsão e determinação.

O aparecimento de defeitos é também bastante comum em materiais compósitos, durante o processamento do material. A existência de tais defeitos no material é muitas vezes inevitável e é também ela responsável pela variabilidade de comportamento do material. A presença de defeitos internos leva à redistribuição das tensões no interior do material que podem ter como consequência o aparecimento de modos de falha não previstos.

As características mencionadas dos materiais compósitos traduzem-se em conjunto em elevadas dificuldades na caracterização do material e na determinação das suas propriedades. É neste contexto que a utilidade do método de *building blocks* é evidenciada. O encadeamento lógico dos testes segundo graus de complexidade, bem como a determinação de variáveis progressivamente mais específicas ao projeto, traduzem-se num processo de validação metódico em que a informação adquirida é sempre transposta para níveis superiores. A ênfase depositada no significado estatístico dos testes de níveis inferiores (mais numerosos) torna-se na melhor maneira de combater as incertezas inerentes ao próprio material. O avanço nos níveis de testes segundo este método implica a validação do material em níveis anteriores, sendo que a certificação final da peça é feita após a sintonia de todos os aspetos projetados.

O método de *building blocks* implica também uma coordenação constante do programa de testes com as metodologias analíticas usadas na criação de modelos e de previsões de resultados. Estes métodos analíticos são muitas vezes desadequados à previsão do comportamento de materiais poliméricos, não tendo capacidade de tomar em consideração todas as aspetos relativos à estrutura macro e microscópica do material. Como exemplo, nota-se a extrema dificuldade de simular anisotropia direcional em softwares de simulação de comportamento mecânicos. Mesmo nos últimos tipos de teste do programa, são frequentemente desconhecidos ou ignorados pelos métodos de análise modos de falha que só se evidenciam em testes de escala real.

O desenvolvimento dos testes em constante troca de dados com os métodos analíticos leva, por isso, ao aperfeiçoamento simultâneo dos dois.

O caso para a adaptação do método de testes por *building blocks* à realidade da impressão 3D, começa pela evidência da semelhança do tipo de dificuldades sentidas na caracterização deste tipo de manufatura e o de criação de compósitos de matriz polimérica. O quadro seguinte faz um paralelo entre os problemas sentidos na caracterização de materiais compósitos de matriz polimérica e o de peças poliméricas obtidas por extrusão de polímero, e resulta da compilação de relatos e dados científicos obtidos de fontes bibliográficas e das experiências adquiridas ao longo do trabalho desenvolvido para esta tese de mestrado (só no caso de impressão 3D):

Tabela 3. 1 Semelhanças entre polímeros processados por impressão 3D e materiais compósitos de matriz polimérica

Impressão 3D por extrusão de polímero	Material compósito de matriz polimérica
<ul style="list-style-type: none"> • Anisotropia resultante da deposição do material linha-a-linha e camada-em-camada. • Possibilidade de aparecimento de defeitos devida à falta de monitorização total da impressão. • Imprevisibilidade na determinação de propriedades devido ao historial térmico da peça (antes, durante e após a impressão). • Falta de ferramentas analíticas para a previsão adequada de comportamentos mecânicos. • Grande espectro de polímeros a trabalhar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Anisotropia resultante da deposição de fibras em substrato polimérico. • Possibilidade de aparecimento de defeitos devida à não homogeneidade do material (ao nível da mesoestrutura). • Imprevisibilidade na determinação de propriedades devido à mistura de dois componentes diferentes. • Falta de ferramentas analíticas para a previsão adequada de comportamentos mecânicos. • Grande possibilidade de combinações matriz+fibras

Outro dos aspetos que torna a aplicação do método de *building blocks* útil na avaliação de materiais processados por impressão 3D por extrusão de polímeros é a grande carência por uma base de dados completa de propriedades dos materiais utilizados. Os esforços feitos na caracterização do material no método de *building blocks* conferem generalidade total aos resultados obtidos no primeiro nível de testes. Conjetura-se que os materiais poliméricos, ao serem estudados por este método, não seriam adequadamente classificados como a informação obtida poderia ser armazenada para estudos futuros. Isto torna-se mais útil quando se considera a

fraca e inconsistente caracterização do material por parte do fabricante e o facto de essa informação não ser regulada nem obrigatória.

Com o objetivo de se testar esta possibilidade, foram idealizados e elaborados três ensaios experimentais cujo encadeamento foi baseado na metodologia de testes por *building blocks*. Todos os testes envolveram a impressão de provetes de teste por extrusão de polímero, sendo que o material escolhido para ser sujeito aos testes foi o Nylon-6, mais especificamente o Nylon 645 da marca Taulman3D. Os ensaios foram realizados com o objetivo de simular a lógica de estratificação dos tipos de teste do método de *building blocks*, não constituindo uma aplicação total do método. Os ensaios experimentais são sumariamente descritos e devidamente elaborados no capítulo Ensaios Experimentais. Posteriormente à realização dos ensaios mecânicos nos provetes, produziram-se componentes e subcomponentes, nomeadamente um cabide e um reservatório pressurizado em Nylon-6, com vista ao seu estudo estrutural. Os subcomponentes foram também estudados computacionalmente através da utilização do Método dos Elementos Finitos.

A descrição dos testes realizados é descrita em seguida:

- **Teste de provetes**

Descrição: Teste de duas séries de provetes com mesoestruturas diferentes, impressos em Nylon-6, com recurso à norma ISO 527.

Bloco: Este tipo de teste é o primeiro de todos no método de teste de *building blocks*. Sendo o teste que dá início ao método, concerne as propriedades mais básicas e inerentes ao material. As propriedades testadas prendem-se com o comportamento mecânico básico do material. A informação adquirida seria transposta para os ensaios mais complexos dos blocos de nível superior.

Tipo de variáveis: Genéricas; Base de dados

Objetivo: Determinação de propriedade mecânicas do material processado por extrusão de polímero.

Variável de teste: Gráficos tensão/extensão do material; Módulo de Young; Tensão de cedência.

- **Teste de subcomponentes**

Descrição: Pressurização de um reservatório, a valores de pressão constantes e crescentes, impresso em Nylon-6, e simulação numérica do reservatório pressurizado.

Bloco: O ensaio de subcomponente caracteriza-se pelo isolamento e teste de um aspeto de um componente. A inserção no método de *building blocks* faz-se a meio da escala. O aspeto isolado testado nos ensaios é o comportamento de expansão diametral de um reservatório existente e a sua estanquidade. A obtenção das variáveis desejadas é feita através da modelação da casca do reservatório isolada de qualquer outro pormenor da peça.

Tipo de variáveis: Não genérica; estrutural

Objetivo: Análise do comportamento de expansão do reservatório e validação do modelo computacional, baseado nas propriedades mecânicas determinadas no teste de provetes.

Variável de teste: Deslocamento radial na casca do reservatório pressurizado.

- **Teste de componentes**

Descrição: Ensaio das condições de trabalho de um cabide, impresso em Nylon-6, e simulação do processo de deformação em programas computacionais envolvendo a aplicação do Método dos Elementos Finitos.

Objetivo: Análise do comportamento de deformação e recuperação elástico do cabide e validação do modelo computacional, baseado nas propriedades mecânicas determinadas no teste de provetes.

Bloco: Na ordem do método de *building blocks*, este ensaio aparece no fim da escala, precedendo os ensaios à escala real do sistema de componentes. Foi isolado e estudado um aspeto particular de um componente à escala real. O componente foi colocado em posição de serviço e solicitado de maneira a emular um espectro de forças passivas de serem aplicadas numa situação real.

Tipo de variáveis: Não genérica; estrutural

Variável de teste: Deslocamento máximo na área crítica do cabide.

4 Material

O material escolhido para serem executados os ensaios experimentais, definidos com o objetivo de provarem o conceito do método de implementação sugerido, foi o Nylon 6. Mais especificamente, o filamento Nylon 645 da marca Taulman3D.

O critério de escolha do Nylon 6 para ser testado como caso de estudo tem como base a visível falta de informação precisa sobre este material no contexto de impressão 3D, quando comparado com materiais mais testados no mercado como o ABS ou o PLA. Contudo, apesar de ser menos utilizado que outros tipos de polímero e de ser mais difícil de imprimir, a resposta da comunidade de impressão 3D relativamente aos resultados obtidos com impressões em Nylon 6 são favoráveis, mostrando as peças finais qualidades estruturais e propriedades mecânicas muito melhores que as dos polímeros mais utilizados.

Conjetura-se assim que o Nylon 6 e as impressoras capazes de o processar possam criar peças com aplicações industriais, supondo que se leva a cabo uma caracterização pormenorizada do material usado, do contexto em que se pretende usar e de uma parametrização adequada e especificada do processo de impressão.

Nesta secção da dissertação, descreve-se o material utilizado nos ensaios na sua generalidade e no caso específico do produto adquirido. Qualquer aspeto do Nylon 6 que tenha tido especial relevância no caso particular dos ensaios executados será mencionado na altura apropriada. A informação apresentada nesta secção será comparada com a realidade de imprimir com este material e dos resultados obtidos, sendo uma das partes de maior interesse no contexto deste trabalho a veracidade dessa informação.



Figura 4. 1 Bobina de filamento de Nylon 645, utilizado neste trabalho

4.1 Caracterização

O Nylon 6 (ou poliamida 6) foi sintetizado na década de 1930 pelo químico alemão Paul Schlack como alternativa ao Nylon 6,6, concebido e comercializado poucos anos antes. Contudo, apesar de terem surgido quase na mesma altura e de terem uma estrutura química quase idêntica, o processo de síntese de ambos é bastante diferente: o Nylon 6,6, à semelhança da maioria dos tipos de nylon, surge duma reação de condensação polimérica (especificamente entre hexametilenodiamina e ácido adipico (Figura 4.2), enquanto o Nylon 6 surge de uma polimerização por rompimento de anéis de caprolactama (Figura 4.3), uma molécula heptagonal de amida com seis átomos de carbono (daí o “6” em Nylon 6).

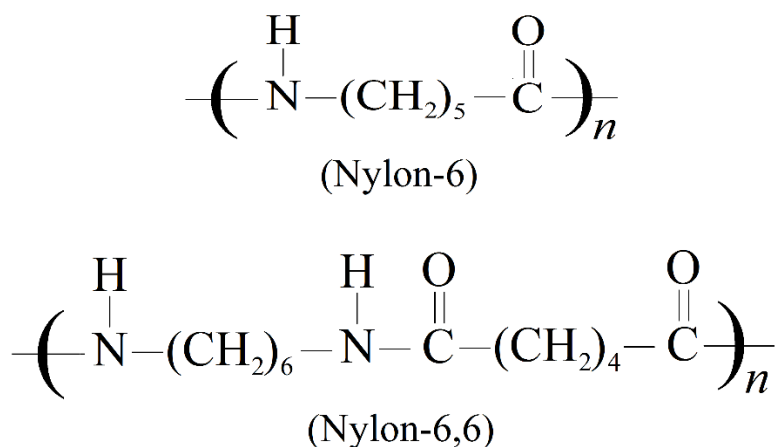


Figura 4. 2 Estrutura do Nylon-6 VS. Nylon-6,6

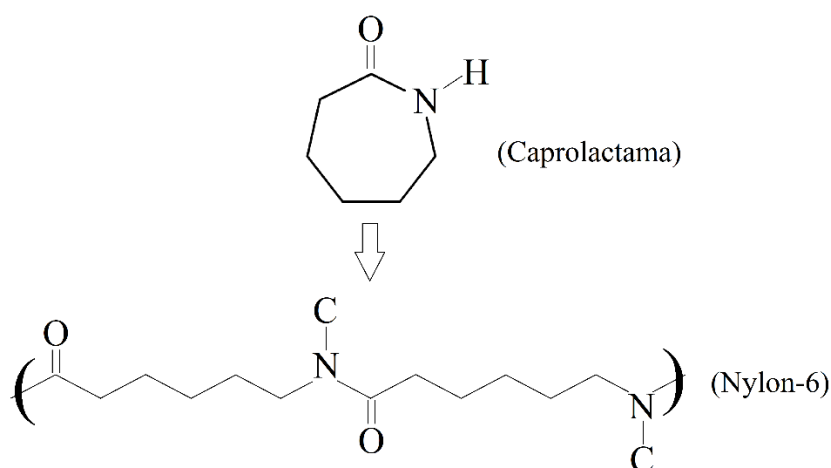


Figura 4. 3 Processo de formação do Nylon-6

No atual estado da indústria de impressão 3D, é sempre boa prática no contexto da caracterização de um novo material começar pela consulta de informação empírica coletada por

utilizadores entusiastas e disponibilizada *online* em fóruns e em sites especializados. Para além de ter que ser tratada e cruzada com várias fontes, a validade desta informação é variável visto surgir na sua maioria de experiências próprias de cada utilizador e, por conseguinte, ser relativa a um contexto de impressão específico. A sua consulta é, contudo, um primeiro passo a dar no início da adoção de um material novo visto tender para algumas conclusões consensuais especialmente ao nível de resultados finais e das mais generalizadas dificuldades a enfrentar aquando da impressão. Tendo em conta este tipo de informação, a comparação do nylon com o ABS e o PLA é geralmente o primeiro passo e o fio condutor de uma descrição comparativa, para que um utilizador que pretende experimentar com nylon saiba como agir e o que esperar, assumindo que já imprimiu com os materiais mais recorrentes e massificados. Neste contexto, é seguro dizer que a maioria dos utilizadores faz recurso ao nylon quando as peças a imprimir precisam de certo tipo de características que o ABS e o PLA (entre outros) não conseguem fornecer.

A funcionalidade do Nylon 6 é o seu principal aliciante quando comparado com os outros tipos de materiais disponíveis. Em aplicações estruturais, a durabilidade e as propriedades mecânicas ultrapassam largamente o oferecido pelo ABS e o PLA. A resiliência do Nylon 6 é notável no fabrico de peças sujeitas a solicitações mecânicas, sendo que dentro dos materiais utilizados neste processo de fabrico o nylon oferece valores de elasticidade e tenacidade bastante atrativos que se mantêm, de certo modo, quando o material é extrudido. Como termo de comparação é frequentemente usado o ABS (consideravelmente mais resistente que o PLA) que, apesar de relativamente forte, é bastante mais frágil que o nylon. As características mecânicas do Nylon 6 possibilitam, por isso, que este material tenha uma aplicação quase exclusiva em certo tipo de componentes.

São seguidamente referidas algumas vantagens do uso de Nylon-6 no contexto de impressão 3D (em comparação com outros materiais), que se mostraram consensuais no decorrer da pesquisa por informação útil no projeto de peças em nylon e do consequente pré-processamento:

- Alta durabilidade;
- Boas propriedades estruturais;
- Rigidez das peças fabricadas;
- Flexibilidade em peças pouco densas (quando necessária);
- Baixa reactância química e à radiação UV;
- Baixa deformação e presença de grão nas peças finais (quando processado devidamente);
- Boa resolução nas peças finais;

- Facilidade de coloração (quando necessário).

Adicionalmente, em *Boparai et al., 2016* faz-se o caso para a sustentabilidade deste material através de processos de reciclagem de desperdícios para o fabrico de filamento de Nylon-6 para uso em impressão 3D.

Grande parte destas vantagens deve-se a uma das características mais positivas do Nylon-6 quando impresso: a coesão das camadas, devido à grande aderência entre as mesmas que o material proporciona. Com efeito, mesmo em baixas resoluções, a fratura do material não se dá necessariamente entre camadas (este assunto será elaborado mais adiante na secção do relatório que lida com os ensaios de propriedades mecânicas feitos a provetes deste material).

Por outro lado, seguem algumas das desvantagens e dificuldades mais comuns em trabalhar com nylon neste contexto:

- Elevada higroscopia;
- Exigências no armazenamento para conter e eliminar a humidade;
- Incapacidade de ser processado em todas as impressoras (devido às exigências térmicas da impressão);
- Possibilidade de encolhimento aquando do arrefecimento depois de ser depositado;
- Baixo prazo de validade;
- Altas tensões internas durante a impressão;
- Fraca resistência química a ácidos e bases fortes.

De facto, a alta higroscopia do nylon torna-o consideravelmente difícil de trabalhar; tal foi confirmado na impressão dos provetes para teste pelo que esta característica do material será mais explorada nessa secção.

4.2 Fabricante

Como já foi mencionado, o produto adquirido para levar a cabo os ensaios de teste pertinentes nesta tese foi o Nylon 645 da marca Taulman3D (Figura 4.4).

A Taulman3D produz exclusivamente filamentos para impressão 3D por extrusão de polímero, pondo à disposição, pela altura em que este relatório foi escrito, onze tipos de filamento diferentes. Seis dos produtos comercializados são filamentos de nylon pelo que a empresa é relativamente conhecida pela sua relação com o nylon no espectro de impressão 3D por extrusão

de polímero, sendo amplamente coberta em sites da temática e um dos primeiros resultados numa busca por este tipo de filamento.

Segundo o afirmado no site da empresa, o Nylon 645 foi desenvolvido no seguimento de um outro filamento de nylon, o Nylon 618, como resposta ao *feedback* das entidades industriais que adotaram o seu antecessor e afirmaram a vontade de trabalhar com um filamento de nylon com melhores propriedades estruturais e cujos produtos finais fossem mais fáceis de avaliar. É publicitado como um filamento semi-transparente (50%), capaz de suportar grandes tensões, com uma durabilidade e resistência térmica elevadas e com uma resistência química ligeiramente melhor que o seu antecessor.



Figura 4. 4 Logo da taulman3D (Fonte: website da Taulman3D)

Ao procurar a informação necessária para a preparação da impressão com o produto adquirido, surgem algumas inconsistências potencialmente relacionadas com o afirmado pelo relatório do NIST relativamente à falta de normalização da informação fornecida pelo fabricante. Integram-se neste tipo de informação as seguintes quatro instâncias (as únicas encontradas) em que a Taulman3D elabora nas condições de impressão do Nylon 645:

1. Uma página de especificações com algumas propriedades organizadas numa tabela e algumas orientações (online) (<http://taulman3d.com/nylon-645-spec.html>)
2. Uma página de FAQ's (*frequently asked questions*) com respostas a dificuldades mais comuns e especificações para a maquinaria no material por impressão 3D e outros métodos (online) (<http://taulman3d.com/645-features.html>)
3. Um cartão presente na caixa do material com uma tabela onde estão organizados todos os produtos da Taulman3D e com valores para as respectivas temperaturas de impressão, temperatura da cama e material da cama (Figura 4.5).
4. Uma ficha de segurança em formato .pdf (online) (http://taulman3d.com/uploads/3/4/4/1/34410163/nylon_645.pdf)

Existem, de facto, algumas inconsistências entre a informação transmitida por estas fontes. Tais inconsistências podem tornar-se bastante problemáticas considerando que a informação disponibilizada tem como objetivo a parametrização da impressão e, tendo em conta a fragilidade do processo relativamente às condições iniciais devido à interdependência de todas

as grandezas envolvidas no processo, podem induzir o utilizador em erro e comprometer os resultados finais e todo o processo. As inconsistências tidas como mais graves são sumariamente listadas:

- As temperaturas de impressão são listadas de maneira diferente e incongruentes: em 1 é afirmado que deve ser entre 250 e 255°C, em 2 como sendo de 245°C para resultados ótimos e em 3 como sendo entre 250 e 255°C. Adicionalmente, em 2 o primeiro conselho dado é o de confirmar que “a impressora consegue imprimir entre 242 e 248°C”, o que exclui todo o espectro de temperaturas de impressão em 1.
- As fontes contradizem-se no que diz respeito ao material da cama de impressão. Enquanto que em 1 e 3 se diz que a melhor base para a impressão com o Nylon 645 é vidro coberto com cola PVA (“cola branca”), em 2 é explicitamente dito que o produto não vai aderir a bases de vidro, afirmando que a melhor base é uma placa de madeira de choupo ou garolite coberta com *painter's tape* (que grande parte dos sites da especialidade garante será arrancada da base durante a impressão).
- Indicações para a temperatura da base de impressão são de 30 a 65°C em 1, 45°C em 3 e inexistentes em 2.
- A temperatura de fusão é tida como 217°C em 1, 207°C em 4 e não explicitada em 2 nem em 3.

taulman3D Materials
Best initial print settings

Material	Print Temp	Bed Temp	Bed Material
Alloy 910	250C 255C	45C	Glass w/PVA
t-glass	235C 240C	45C	Glass w/PVA
Nylon 645 and Nylon 660	245C 255C	45C	Glass w/PVA
Nylon 618	245C 255C	70C	Garolite LE
TECH-G	235C 240C	45C	Glass w/PVA
Nylon Bridge	245C 255C	45C	Glass w/PVA
Nylon 230	230C 235C	45C	Glass w/PVA
PCTPE	230C 235C	45C	Glass w/PVA
T-Lyne	190C 220C	50C	Clean Glass
T2012	245C 250C	45C	Glass w/PVA
n-vent	245C 250C	45C	Glass w/PVA

PVA = "Elmer's Glue All" Only...Apply at 45 C and wait 2 min to dry.

NOTE: Nylon is susceptible to ambient moisture/humidity. For a simple drying process see <http://taulman3d.com/drying-materials.html>.

Drying "any" material will always improve the printed part's shiny surface features and greatly reduce particulate emissions.

taulman3D
High strength 3D Printing Materials

Why "taulman3D"? taulman3D works directly with major Chemical Companies like DuPont Chemical, Eastman Chemical and others to develop and provide the best chemicals possible specifically for 3D Printing. The raw pellets used in manufacturing of taulman3D materials "always" come directly from the major Chemical Co and never a re-seller or third party. This insures you that not only is quality maintained, but trace-ability through the entire process from the original source to you and your print.

We also believe that our contribution to the 3D Printing community is to be a professional bridge between the community and Large Chemical companies. As a community of a fast paced technology, we must be able to provide a quick understanding of our needs and desired features to very large corporations that have for years faithfully severed Injection molding, Roll molding, Blow molding and other standard methods of mass manufacturing. We strive to explain the advantages as well as the limitations of FFM to Companies so that they can quickly identify probable new materials to meet the needs of the community and get those materials into test as soon as possible and eventually to the end user. For questions email taulman@taulman3d.com

www.taulman3D.com

Figura 4. 5 Panfleto informativo embalado com o filamento de Nylon 645

Adicionalmente, a informação contida em 4 está vastamente incompleta, sendo que, por exemplo, na secção de propriedades químicas e físicas do material, são listadas vinte grandezas das quais apenas seis têm valores atribuídos. Similarmente, nenhum dos efeitos ecológicos e informações de transporte tidos como importantes o suficiente para estarem patentes no documento foram determinados. Também pouco é dito para colmatar a higroscopia do material, mencionada na secção anterior, que pode ser tão prejudicial à impressão e nos resultados finais: enquanto que em 1, 2 e 4 nada é dito sobre esta matéria exceto que o nylon deve estar o mais seco

possível antes da impressão, em 3 o utilizador é referenciado para uma outra página da marca (<http://taulman3d.com/drying-material.html>); não mencionada em nenhuma das outras fontes) onde lhe é sugerido o aparato para secar/armazenar o filamento que “é usado nos nossos laboratórios” mas cuja disponibilidade não é mencionada. Em nenhuma das instâncias é sugerida a técnica de secar o nylon num forno durante um determinado período de tempo e a uma certa temperatura, muito presente nos sites que fornecem indicações sobre imprimir com nylon.

Para além dos casos específicos suprarreferidos, a marca descompromete-se da validade da informação fornecida de várias maneiras, umas mais explícitas que outras. Como exemplo, notam-se o uso de aspas em palavras-chave (e.g. *‘The raw pellets (...) “always” come directly from the major Chemical Co and never a re-seller or third party’*, *‘Drying “any” materials will always improve the printed part’s shiny surface (...)’*) e um aviso em 2 sobre como as especificações estão sujeitas a alterações sem aviso prévio.

Enquanto que não é um objetivo deste trabalho aferir a legalidade destas situações, nota-se que este tipo de incongruências pode ser bastante prejudicial ao consumidor e à sua capacidade de trabalhar com o produto adquirido. A não regulação deste tipo de informação é uma barreira a ultrapassar pela comunidade dedicada à impressão 3D, sendo este tipo de situação bastante recorrente quando tecnologias revolucionárias e disruptivas começam a massificar-se. Apesar de tudo, a taulman3D é uma marca com uma imagem bastante positiva na comunidade e, apesar das incongruências, é das marcas que mais informação fornece acerca dos seus materiais.

Os efeitos da ausência e não coordenação deste tipo de informação tornar-se-ão mais evidentes com o caso prático da impressão dos provetes para os ensaios experimentais, onde serão feitas bastantes referências a esta parte do relatório.

4.3 Propriedades

Um dos objetivos do presente trabalho é a determinação experimental de certas propriedades mecânicas do Nylon 645. Será portanto necessário recorrer a valores pré-definidos de propriedades deste tipo de material para a projeção do processo de impressão e dos ensaios experimental e como termo de comparação (controlo) dos dados obtidos. Para este fim, usaram-se as tabelas disponibilizadas na base de dados de materiais *open source* MatWeb, despegada de qualquer compromisso com fabricantes do produto. São disponibilizadas seis categorias de propriedades: físicas, mecânicas, elétricas, térmicas, óticas e de processamento, estando as elétricas e óticas fora do interesse deste trabalho. Segue a tabela de propriedades mecânicas adaptada com algumas das propriedades do Nylon 6 extrudido, de interesse neste contexto:

Tabela 4. 1 Propriedades pré-definidas para o Nylon-6 (adaptado de matweb.com)

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Rockwell M	85.0
Hardness, Rockwell R	97.0 - 121
Hardness, Shore D	79.0 - 82.0
Ball Indentation Hardness	50.0 - 160 MPa
Tensile Strength, Ultimate	42.0 - 80.0 MPa
Film Tensile Strength at Yield, MD	30.0 - 40.0 MPa
Film Tensile Strength at Yield, TD	30.0 MPa
Tensile Strength, Yield	29.0 - 186 MPa
Film Elongation at Break, MD	310 - 359 %
Film Elongation at Break, TD	280 - 360 %
Elongation at Break	1.50 - 315 %
Elongation at Yield	2.50 - 92.0 %
Modulus of Elasticity	0.350 - 3.50 GPa
Flexural Yield Strength	28.0 - 276 MPa
Flexural Modulus	0.520 - 13.8 GPa
Izod Impact, Notched	0.300 - 5.30 J/cm
Physical Properties	Metric
Density	1.03 - 1.29 g/cc
Water Absorption	0.0200 - 10.0 %
Moisture Absorption at Equilibrium	1.30 - 3.00 %
Water Absorption at Saturation	8.50 - 10.0 %
Melt Temperature	216 - 300 °C

É de notar *a priori* o conservadorismo dos dados da tabela face aos fornecidos pelo fabricante relativamente ao ponto de fusão e a presença de valores para a higroscopia, resistência mecânica e condições de impressão, ausentes em qualquer informação oferecida pelo fabricante.

5 Ensaios Experimentais

5.1 Teste de provetes

5.1.1 Objetivo

Como já foi referido neste relatório, uma das principais dificuldades inerentes à implementação da impressão 3D num contexto industrial é a falta de previsibilidade das propriedades mecânicas da peça fabricada. Aquando da compra do material, a empresa fornecedora pode ou não providenciar o comprador com dados relativos às propriedades mecânicas do material antes e após ser utilizado numa impressão, juntamente com indicações para a sua utilização (i.e. parâmetros de impressão mais adequados, maneiras de armazenar o material convenientemente, cuidados prévios a ter em conta, etc.). Contudo, mesmo quando esta informação é fornecida, toda ela é não regulada e está associada exclusivamente à palavra do fabricante, podendo ser mais ou menos verdadeira. Independentemente da veracidade dos dados fornecidos, a maioria dos fabricantes encontra-se ainda em posição de se desresponsabilizar caso os resultados obtidos pelo utilizador fiquem aquém do que foi publicitado.

Todo este conjunto de incertezas pode dificultar o projeto de peças em impressão 3D e reduzir o espectro de aplicação do material em aplicações mais nobres e funcionais. A determinação das propriedades mecânicas do material utilizado é vital não só na sua aplicação, como também no momento de impressão. Tendo em conta a incerteza relativa ao que é dito pelo fabricante e à falta de regulamentação do mesmo, o primeiro passo a dar antes da utilização de um material em projeto de peças em impressão 3D é a aferição das propriedades mecânicas do material após ser impresso. É de realçar a importância das entidades industriais e académicas neste contexto, visto serem as únicas equipadas com o equipamento necessário para efetuar estes testes, sendo um dos objetivos delineados pelo NIST para resolver este problema a criação de uma base de dados de polímeros para impressão (i.e. o armazenamento de informação relativa às propriedades mecânicas dos materiais proveniente do maior número possível de entidades competentes para depois poder ser cruzada e adquirir fiabilidade estatística).

Em suma, é necessário um conhecimento prévio das propriedades mecânicas de um material para que este possa ser utilizado em projeto de peças. Além das já mencionadas dificuldades inerentes à falta de transparência e regulamentação por parte dos fabricantes de filamento, ainda não foram definidos pelas entidades competentes métodos de testes normalizados para a determinação das propriedades mecânicas de um material processados por impressão 3D. Numa iniciativa para contornar esta dificuldade, o relatório do NIST investigou normas já

existentes para o teste e definição de propriedades mecânicas para materiais compósitos e plásticos e a sua potencial aplicação a materiais processados pela técnica em questão. Neste relatório, as propriedades mecânicas foram divididas em oito grupos diferentes: tensão, torção, flexão, compressão, corte, fluência, fadiga, resistência à fratura, impacto e esmagamento.

No contexto deste relatório, como prova de conceito, foi escolhida uma das normas sugeridas pelo NIST para emular o processo de teste de provetes para a obtenção de valores de propriedades mecânicas. O objetivo subjacente deste exercício é a validação da aplicabilidade da norma proposta pelo NIST a um material escolhido e comparação dos resultados obtidos com os valores fornecidos pelo fabricante do material.

5.1.2 Norma ISO 527

Decidiu-se fabricar os provetes e executar os ensaios e tratamento de resultados de acordo com a norma ISO 527-4:1997, cuja aplicabilidade no contexto de impressão 3D foi classificada com “S.C.O.” pelo NIST, para a obtenção de propriedades mecânicas do material relativas à tensão.

O comité ISO 527 concerne a determinação de propriedades tensoriais de plásticos e compósitos de base polimérica como o coeficiente de Poisson, o alongamento total, o módulo de Young e o limite de elasticidade, entre outras. O objetivo da norma e a sua estrutura são explicitados resumidamente no site da própria ISO:

“ISO 527-1:2012 specifies the general principles for determining the tensile properties of plastics and plastic composites under defined conditions. Several different types of test specimen are defined to suit different types of material which are detailed in subsequent parts of ISO 527. The methods are used to investigate the tensile behaviour of the test specimens and for determining the tensile strength, tensile modulus and other aspects of the tensile stress/strain relationship under the conditions defined.”

De facto, a primeira parte da norma, a ISO 527-1:2012, trata dos procedimentos gerais e comuns a todo o escopo da norma. Os fascículos 2, 3, 4 e 5 concernem diferentes maneiras de processar os plásticos tendo em conta as características morfológicas do material quando processado de diferentes maneiras. A norma ISO 527 divide-se portanto da seguinte maneira, consoante as suas partes:

- **ISO 527-1:2012 -- Part 1: General principles**
- **ISO 527-2:2012 -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics**

- ISO 527-3:1995 -- Part 3: *Test conditions for films and sheets*
- **ISO 527-4:1997 -- Part 4: *Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites***
- ISO 527-5:2009 -- Part 5: *Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*

As partes desta norma utilizados no presente trabalho foram, portanto, os fascículos 1 e 4. A pertinência da analogia entre o teste de propriedades mecânicas de materiais compósitos reforçados com fibras e de materiais poliméricos processados por impressão 3D reside precisamente na ortotropia comum aos dois. Nos compósitos reforçados, a direção das fibras confere um comportamento variável às propriedades mecânicas do material consoante a direção da aplicação das forças, visto que a orientação das fibras é variável e parcial a determinadas direções. Algo muito parecido acontece com o material processado por impressão 3D, visto que neste processo, tendo em conta os seus princípios tecnológicos, aquando da impressão de uma peça, o material é depositado em linhas paralelas numa determinada direção em cada *slice*. Isto faz com que o resultado final seja inerentemente ortotrópico consoante as direções nas quais a peça foi impressa (i.e. a posição em que a peça foi orientada no *software* de pré-produção e, consequentemente, na própria impressora). Tendo em conta o escopo da parte 2 (plásticos processados por moldagem e extrusão), da parte 3 (películas e telas) e da parte 5 (compósitos reforçados unidireccionalmente), a parte desta norma que melhor emula o comportamento de um plástico processado por extrusão de polímero será a 4, sendo que a parte 1 tem que ser forçosamente usada em todos os testes desta norma visto conter a informação geral a todas as outras partes, sendo por consequência referenciada em todas as mesmas.

A norma ISO 527 está dividida em doze capítulos, comuns a todas as partes, encadeados segundo o seguimento lógico do teste proposto:

- 1 – Escopo
- 2 – Referências normativas
- 3 – Princípio
- 4 – Definições
- 5 – Aparato
- 6 – Provetes de teste

- 7 – Número de provetes de teste
- 8 – Condicionamento
- 9 – Procedimento
- 10 – Cálculo e apresentação de resultados
- 11 – Precisão
- 12 – Relatório do teste

O primeiro capítulo concerne a abrangência da norma e das suas partes em particular, referenciando os tipos de plásticos e compósitos que cada uma trata, sendo que neste capítulo na ISO 527-4:1997 é referenciada a especificidade suprarreferida desta parte em lidar com materiais reforçados multidirecionalmente. A grande semelhança entre a morfologia dos materiais já abrangidos por esta norma e a dos materiais processados por extrusão de polímero é evidenciada quando é afirmado que a norma cobre materiais “termoplásticos compósitos que incorporam reforços não unidirecionais”, “combinações destes reforços unidirecionais ou multidirecionais, construídos em camadas unidirecionais, desde que tais camadas sejam simétricas” e “peças finais feitas destes materiais”, categoriais em que os materiais estudados neste relatório podem facilmente ser integrados.

As referências normativas do segundo capítulos fazem chamadas a outras normas existentes que podem ser acessórias aos testes a conduzir nesta norma. Enquanto algumas dizem respeito a normas que lidam com questões logísticas relativas à generalidade destes tipos de teste (nomeadamente condicionamento, atmosfera e análise estatística), algumas são relativas ao fabrico dos provetes de teste ou à sua maquinaria. Neste contexto, estas últimas normas não foram consideradas tendo em conta o processo de fabrico de provetes levado a cabo, que torna qualquer tipo de maquinaria e pós processamento dos provetes desnecessários, desde que estes consigam ser impressos com o toleranciamento mínimo exigido pela presente norma.

A primeira parte da norma, descreve o princípio base do teste (no capítulo 3) como:

“O provete de teste é tracionado ao longo do seu eixo longitudinal principal até à fratura ou até a tensão (carga) ou a extensão (alongamento) atingirem um valor pré-determinado. Durante o processo, a carga suportada pelo provete e o seu alongamento são medidos.”

As grandezas e variáveis envolvidas no processo de teste são definidas no capítulo 4 como sendo: o comprimento de referência, a velocidade de teste, a tensão de tração e as suas

subdivisões, a extensão de tração e as suas subdivisões, extensão nominal, módulo de Young e coeficiente de Poisson. É também definido o eixo de coordenadas a usar. Estas serão mais explicitadas neste relatório aquando da sua menção e utilização.

No capítulo 5 são feitas considerações acerca do equipamento utilizado nos testes. Resumidamente, é estipulado que a máquina de ensaio tem que conseguir trabalhar com os valores da lista de velocidades de teste recomendados e que as garras que constroem o provete durante o ensaio estejam suficientemente apertadas para que não ocorra escorregamento mas sem pré-fratura do provete. É também exigido neste capítulo que o extensómetro utilizado nas medições tenha uma precisão mínima de 1% na medição da zona de teste do provete e que não sofra os efeitos da inércia à velocidade de teste utilizada. São impostas condições à precisão do micrómetro utilizado na medição dos provetes, sendo que é exigido um micrómetro com a resolução mínima de 0.01 mm para os testes da parte 4 da norma.

Os provetes a utilizar nos ensaios são definidos no capítulo 6. São considerados três tipos de provetes para os testes a efetuar com a norma ISO-527-4:1997: tipo 1B, tipo 2 e tipo 3. O tipo 1B é destinado a compósitos poliméricos termoplásticos reforçados com fibras enquanto os tipos 2 e 3 são destinados a compósitos termoendurecíveis reforçados com fibras. Esta secção do relatório é talvez a mais carente de adaptações para ser aplicada no contexto de impressão 3D. Os provetes foram dimensionados propositadamente para o tipo de materiais compósitos coberto pela quarta parte da norma, sendo que é impossível fazer-se uma correspondência inequívoca entre qualquer um dos três tipos e o mais adequado a usar para o nylon não reforçado de que será feito. O critério de decisão prendeu-se, portanto, quase exclusivamente com o facto de o nylon ser um termoplástico, logo o tipo de provete adotado foi o 1B (Figura 5.1), visto que os outros dois lidam com polímeros termoendurecíveis. Sendo praticamente semelhantes, a principal diferença entre o tipo 2 e o tipo 3 é o facto de as abas do último serem reforçadas. O tipo 3 é por isso só utilizado se o tipo 2 não apresentar resultados satisfatórios. É também exigida a conformidade de todos os provetes às diretivas da norma e aos toleranciamentos dimensionais presentes nos desenhos. Os provetes têm também que ser livres de defeitos e a aplicação do extensómetro tem de ser feita de maneira a evitar indentações ou outro tipo de marca prejudicial à integridade do provete. Um dos conselhos dados neste capítulo foca-se na anisotropia passiva de ocorrer nos materiais abrangidos por esta norma e recomenda-se que duas séries de provetes sejam fabricados com direções paralelas e perpendiculares à orientação das fibras de reforço. Tendo em conta que a anisotropia também é uma questão importante no contexto de impressão 3D e que, por definição, durante a impressão de um objeto completamente preenchido (como é o caso dos provetes a utilizar) o material é sempre depositado na direção perpendicular à camada anterior, o método adotado para adaptar este pormenor da norma e analisar a anisotropia do provete foi de imprimir duas séries de

provetes: uma série em que a deposição do material é feita paralelamente e perpendicularmente à direção em que o provetes será tracionado (ângulos de 0° e 90°) e outra série em que a deposição do material é feita numa direção oblíqua de 45° relativamente à direção do ensaio (-45° e 45°) (Figura 5.2). A decisão de fabricar os provetes com esta orientação (ou variações da mesma) é recorrente na bibliografia utilizada, quando são feitos ensaios de provetes fabricados por impressão 3D (Rahman *et al.*, 2015).

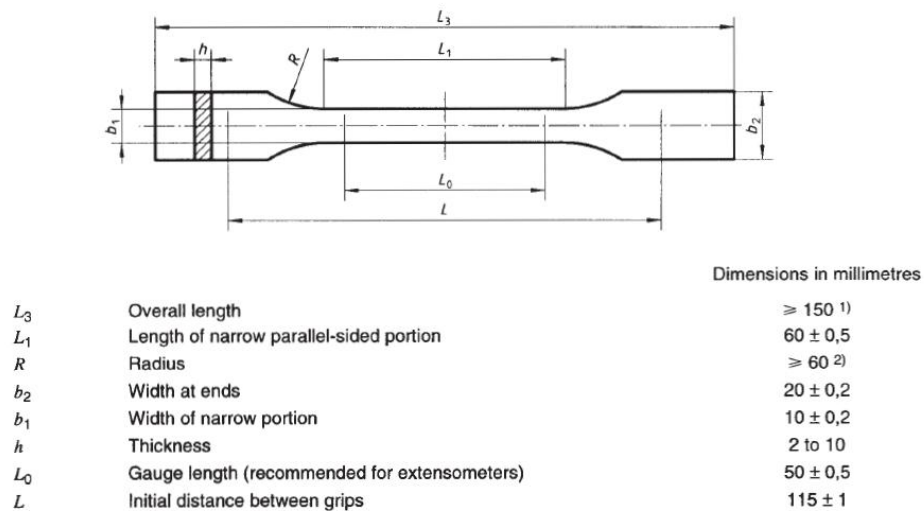


Figura 5. 1 Dimensões dos provetes tipo 1B (Fonte: Norma ISO 4527-4:1997)

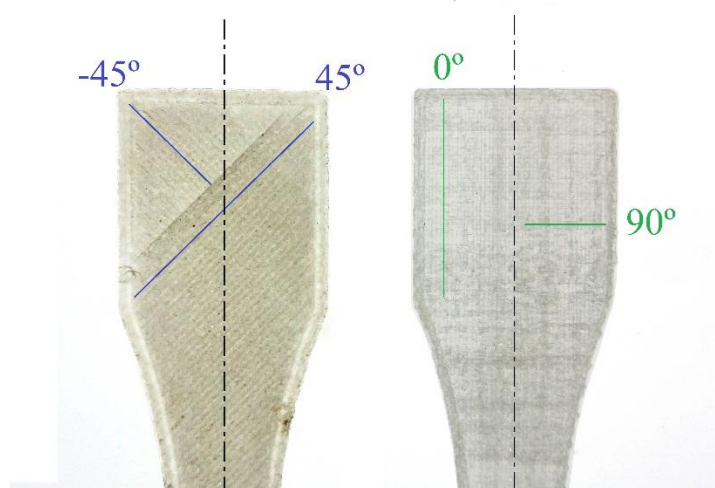


Figura 5. 2 Orientação da deposição de material nas duas séries de provetes

O capítulo 7 define o número de provetes a testar e é comum a todas as partes da norma. Nele é exigido que séries de cinco provetes sejam utilizadas para cada direção definida no capítulo 6, para possibilitar a análise da anisotropia do material. É dito também que provetes que fraturem

fora da zona de teste ou a um centímetro das amarras devem ser descartados. A ocorrência de escorregamento de um provete antes da fratura é também razão para o mesmo ser descartado, tal como os provetes em que a falha tenha ocorrido devido a qualquer fator externo observado. Se a falha da maioria dos provetes ocorrer fora dos limites esperados ou de maneira divergente, a norma acautela sobre a probabilidade da informação coletada no fim ser demasiado conservadora, se bem que com valor estatístico. Contudo, resultados tidos como inválidos ou pouco satisfatórios não devem ser de modo algum descartados, visto que “a variabilidade de tal informação é função da natureza variável do material”.

Pouco é dito nesta norma sobre a atmosfera de condicionamento dos provetes, sendo que a parte 4 remete o utilizador para a parte 1 que apenas diz que, caso não exista um conjunto de valores de temperatura e humidade apropriados especificamente para o tipo de material em uso e se não for acordado um conjunto de valores por todas as entidades envolvidas, o armazenamento dos provetes deve ser feito em concordância com a norma ISO 291. Nesta norma, o tipo de atmosfera definido para a generalidade dos casos é o 23/50 (23°C; 50% de humidade relativa), pelo que se fez os possíveis para manter os provetes nestas condições.

O procedimento de teste é definido em sete passos que são comuns a todas as partes da norma no capítulo 9, com a exceção das velocidades de teste, as quais a parte 4 define consoante o tipo de provete. Os sete passos da norma são seguidamente enumerados e explicitados:

1. Atmosfera de teste – É definido que a atmosfera de teste deve ser a mesma que a do acondicionamento dos provetes.
2. Dimensões do provete de teste – A conformidade do toleranciamento dos provetes com a norma deve ser medida e avaliada antes da impressão. A largura (b) deve ser medida até ao 0.1mm mais próximo e a espessura (h) até ao 0.02mm. Estas medições devem ser feitas em três sítios dos provetes, no centro e a 5 mm de cada limite da zona de medição. A conformidade dos valores máximos e mínimos deve ser confirmada e a média aritmética calculada para mais tarde ser usada em cálculos.
3. Fixação – Os provetes devem ser fixos nas amarras de modo a ficarem alinhados com o eixo da máquina (e, consequentemente, com a direção de teste). O aperto deve ser feito irmãmente entre as duas amarras e forte o suficiente para evitar o escorregamento do provete.
4. Pré-esforço – Devem ser evitados pré-esforços substanciais antes do início dos testes, que podem advir da amarração do provete. Estes são particularmente prejudiciais em testes

de películas. O pré-esforço deve ser tal de modo a não criar um pré-alongamento superior a 0.05% do alongamento tido como inicial.

5. Montagem do extensómetro – O extensómetro deve ser montado na zona de medição do provete já preso. A distância inicial deve ser medida e registada para mais tarde ser utilizada em cálculos.
6. Velocidade de teste – A norma permite, caso necessário, a variação das velocidades de teste (dentro da mesma série) para a aferição de certo tipo de propriedades, desde que todos os provetes sejam tracionados a velocidade constante. No caso particular da parte 4, os provetes do tipo 1B devem ser tracionados a 10 mm/min para testes de controlo de qualidade e a 2 mm/min para testes de qualificação. Neste trabalho, nove provetes foram tracionados na primeira velocidade e um na segunda.
7. Medição de resultados – A medição de resultados deve ser feita preferencialmente por um método automatizado. Devem ser registados a todo o instante os valores da força e do consequente aumento de tamanho da zona de medição e distância entre amarras.

O capítulo 10 formaliza os cálculos a efetuar com os dados retirados dos testes. Nele são apresentadas as fórmulas e as grandezas a que fazem recurso, estando dividido em seis partes diferentes: cálculos de tensão (10.1), cálculos de extensão (10.2), cálculo do módulo (10.3), coeficiente de Poisson (10.4), parâmetros estatísticos (10.5) e algarismos significativos (10.6). Todos os cálculos devem ser efetuados, excetuando o do coeficiente de Poisson que fica ao critério do utilizador. As fórmulas das primeiras quatro secções deste capítulo e as variáveis que nelas figuram são as seguintes:

10.1:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ – tensão de tração [MPa]

F – força medida [N]

A – área da secção da zona de medição do provete [mm²]

10.2:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} ; \varepsilon(\%) = 100 \times \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

ε – extensão [rácio ou percentual]

L_0 – comprimento inicial da zona de medição do provete [mm]

ΔL_0 – Alongamento da zona de medição [mm]

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L} ; \varepsilon_t(\%) = 100 \times \frac{\Delta L}{L}$$

ε_t – extensão nominal [rácio ou percentual]

L – distância inicial entre amarras [mm]

ΔL – aumento da distância entre amarras [mm]

10.3:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

E_t – Módulo de Young [MPa]

σ_1 [MPa] – tensão para um valor de extensão $\varepsilon_1 = 0.0005$

σ_2 [MPa] – tensão para um valor de extensão $\varepsilon_2 = 0.0025$

10.4

$$\mu_n = -\varepsilon_n / \varepsilon$$

μ_n – coeficiente de Poisson onde n=b (largura) ou n=h (espessura) consoante a direcção normal escolhida [rácio]

ε_n – extensão na direcção normal onde n=b ou n=h

ε – extensão na direcção longitudinal

Nota: Na parte 4 da norma, $\mu_b = \mu_{12}$ e $\mu_h = \mu_{13}$, de acordo com o sistema de eixos definido.

É adicionalmente referido neste capítulo que as tensões e o Módulo de Young devem ser calculados com três algarismos significativos e que as extensões e o Coeficiente de Poisson devem ser calculados com dois.

No capítulo 11 da norma, apenas é referido que a precisão deste teste ainda não foi definida devido à falta de cruzamento de dados entre laboratórios e que em futuras edições da norma talvez este tipo de informação já seja disponibilizado.

Finalmente, no capítulo 12 é descrita a formatação oficial a utilizar. Os resultados dos testes devem ser explicitados da seguinte maneira e incluir a seguinte informação (Anexo 9.5):

- a) Referência à norma utilizada que inclua o tipo de provete e a velocidade do teste no seguinte formato: “Tensile test ISO 527-4/(tipo de provete)/(velocidade de teste em mm/min)”;
- b) Toda a informação coletada do histórico comercial do material testado;
- c) Descrição do material em termos da sua finalidade, incluindo todos os processos de manufatura e tratamento conhecidos;
- d) Tipo de provete em que todas as dimensões da secção de medição são descritas (inclusive as medições exigidas no capítulo 9);
- e) Método de preparação de provetes e informação sobre o seu processo de manufatura;
- f) Direção de corte dos provetes aquando da sua manufatura caso provenham de produtos acabados ou semiacabados (N.A.);
- g) Número de provetes testados;
- h) Informações sobre as condições de condicionamento dos provetes e qualquer tratamento especial que tenha sido levado a cabo;
- i) Grau de Precisão da máquina utilizada;
- j) Tipo de extensómetro;
- k) Tipo de mecanismo de amarração;
- l) Velocidades de teste;
- m) Resultados de testes individuais;
- n) Médias de valores de propriedades medidas, tidas como valores indicativos das propriedades do material;
- o) Desvio padrão, variância e limites de confiança dos cálculos das médias, caso necessário;

- p) Validação ou rejeição dos ensaios de cada provete e respetivas razões;
- q) Data dos ensaios.

5.1.3 Impressão dos provetes

Os provetes necessários para este ensaio foram impressos no FabLab da FCT-UNL. Achou-se por bem efetuar a impressão dos provetes, em vez de se recorrer a uma empresa especializada em impressão 3D, para que o processo fosse acompanhado de perto e analisado no contexto da presente tese de mestrado. Deste modo, todos os passos da impressão foram registados para que as previsões iniciais, principais dificuldades e resultados finais fossem analisados e comparados com o afirmado na pesquisa académica sobre o processo de impressão 3D. A impressão dos dez provetes decorreu num período de cinco dias, sendo que grande parte do tempo foi utilizado na aprendizagem do funcionamento da máquina e no processo iterativo de “tentativa e erro” até serem definidas as condições e parâmetros com os quais se começaram a obter resultados satisfatórios. A impressora disponibilizada para a impressão foi uma Ultimaker 2, da marca Ultimaker.

Uma das primeiras questões a abordar prende-se com a dificuldade em lidar com a higroscopia do nylon, mencionada no capítulo deste relatório que o caracteriza. Com efeito, a capacidade do nylon de absorver humidade da atmosfera em que se encontra pode condicionar o seu uso em impressão 3D e a qualidade dos resultados obtidos. A humidade armazenada no material é depois evaporada violentamente quando o material é feito passar pelo extrusor, sendo este fenómeno observável nas bolhas que se formam quando o material é depositado e pelo barulho que as mesmas fazem a rebentar. O aspeto e a resolução das peças finais são onde se nota mais os efeitos da higroscopia do nylon, perdendo o material alguma da sua transparência e ficando as peças finais com um acabamento mais áspero e irregular. Contudo, algumas fontes apontam para um aumento na aderência entre camadas se o material conservar alguma da sua humidade.

Existem dois métodos generalizados para colmatar o problema da higroscopia do nylon: o seu armazenamento num local seco e isolado com recurso a gel de sílica e a “cozedura” do nylon num forno a sensivelmente 90°C durante algumas horas (o tempo e a temperatura associados a esta técnica variam de fonte para fonte sem que se tenha encontrado algum consenso). Quando foi adquirida, a bobina de filamento encontrava-se embalada em vácuo e os testes iniciais mostraram que tal tinha sido suficiente para mitigar a higroscopia na sua viagem do fabricante ao consumidor. Contudo, os efeitos de estar exposto ao ar ambiente no decorrer das impressões fizeram com que a humidade se acumulasse de facto no material, o que levou à observação dos fenómenos supramencionados e ao decair da qualidade das peças finais. Achou-

se um bom equilíbrio em cozer o nylon durante duas horas a 90°C cada dois dias e em conservá-lo numa caixa hermeticamente fechada com alguns pacotes de gel de sílica: o material mantinha alguma da sua humidade, proporcionando uma boa aderência entre camadas sem piorar muito a resolução do objeto final. Observou-se, contudo, que esta característica do material é de facto uma grande dificuldade a ter em conta com a impressão 3D deste material, e que a solução encontrada funcionou para esta situação em particular, não havendo garantias de que funciona noutro contexto, com outra impressora e outro tipo de peças.

Os provetes foram modelados em *SolidWorks* com as dimensões disponibilizadas na no capítulo 6 parte 4 da norma ISO 527. No trabalho desenvolvido para esta tese de mestrado, os modelos em CAD das peças a serem impressas foram também utilizados nas simulações feitas no *SolidWorks Simulation* e em *Nastran*.

O ficheiro do provete modelado em *SolidWorks* foi depois convertido para o formato “.stl” (*stereolithography*) para que pudesse ser lido pelo software de interface. O software utilizado para a parametrização da impressão (*slicer*) foi o Cura (versão 15.04.6). O programa em questão foi desenvolvido pela mesma empresa que a impressora, o que diminui os problemas de compatibilidade visto que o Cura pode ser utilizado por “todas” as impressoras, mas as características de uma impressora que não esteja na base de dados do software têm que ser inseridas manualmente, aumentando a margem para erro. Uma vez definidos os parâmetros de impressão, um ficheiro do tipo GCode que contém todos os dados programados para a impressão refletidos na trajetória do extrusor, camada a camada, é gravado num cartão de memória passível de ser aceite na porta presente na impressora, para que a informação seja comunicada à máquina. Enquanto que a maioria da parametrização da impressão é feita no *slicer*, é possível programar ou fazer alterações ao definido no Cura na própria impressora através do *interface* da mesma (Figura 5.3).

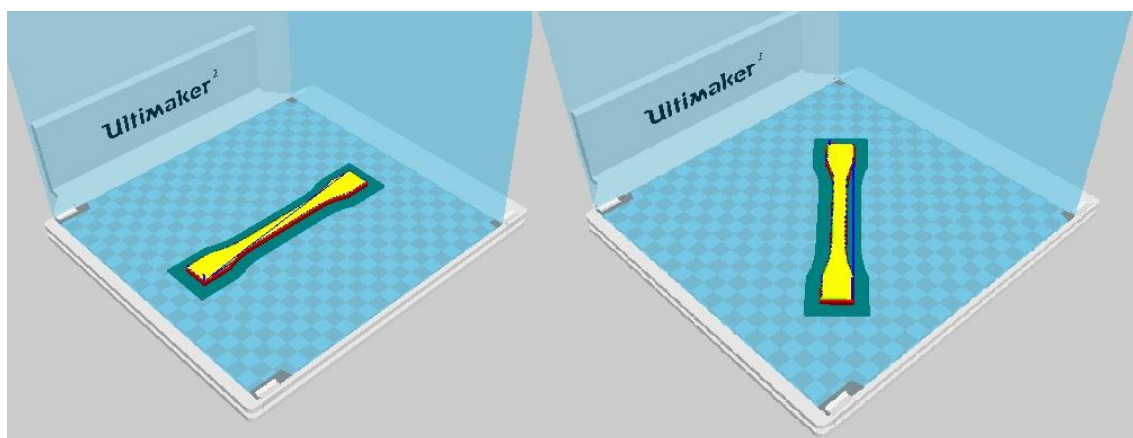


Figura 5. 3 Orientação dos provetes das séries -45°/45° e 0°/90 no Cura.

Como já foi afirmado neste relatório, a grande quantidade de parâmetros em jogo no processo de impressão 3D é consideravelmente difícil de controlar na sua plenitude. Isto deve-se não só ao facto da influência e sensibilidade de cada parâmetro ser variavelmente notável e importante, como também devido à maneira como todos os parâmetros interagem uns com os outros e ao facto dessas interações terem efeitos na realidade da impressão quase impossíveis de prever na sua totalidade com a tecnologia existente. Posto isto, começou-se por definir as características desejadas nas peças impressas. Tendo em conta o objeto a imprimir e para que todos os provetes respeitassem o exigido pela norma segundo a qual vão ser testados, começou-se por se definir as características desejadas nas peças finais. São seguidamente expostas essas características, classificadas com o grau de importância que têm relativamente umas às outras e ao produto final como “***” para os aspetos tidos como imperativos, “**” para os importantes e “*” para os preferíveis:

- Preenchimento total *** - Para serem analisados com recurso à ISO 527, os provetes têm que ser impressos completamente preenchidos. A quantidade de material na parte interior da peça (i.e. tudo o que não é a superfície da mesma) pode ser regulada percentualmente nos parâmetros da impressora (*infill*). O software encarrega-se de projetar uma malha interna para que o material seja depositado o mais uniformemente ao longo de cada camada. O diminuir a quantidade de material dentro da peça não só reduz o tempo de impressão como também diminui a quantidade de tensões internas na peça a ser processada, diminuindo assim as probabilidades de esta se deformar ou descolar da base durante a impressão. No presente caso, contudo, os provetes têm que ser perfeitamente sólidos, pelo que o *infill* foi sempre mantido a 100%.
- Integridade das peças *** - Os provetes não podem sofrer deformações durante a impressão, tendo que manter a retilinearidade das suas arestas e o paralelismo entre as mesmas, bem como a planeza das suas superfícies. Impressões onde tenham acontecido deformações (*warping*) foram descartadas. Adicionalmente, partes da impressão onde o extrusor tenha tocado na peça queimando o material na zona de medição foram igualmente descartados, visto que tais defeitos no provete podem originar concentração de tensões ou outros fenómenos irregulares durante os testes.
- Toleranciamento *** - Tendo em conta a simplicidade da geometria dos provetes, decidiu-se que uma resolução equivalente a 0.2 mm de espessura de camada seria suficiente. Enquanto que a resolução escolhida é relativamente baixa, o facto da espessura das camadas ser mais elevada leva a que menos camadas sejam necessárias para a imprimir a peça, o que por sua vez a torna mais forte e resiliente, levando a que o efeito de escorregamento entre as mesma esteja menos presente nos teste permitindo assim uma

melhor caracterização das propriedades mecânicas do material. Contudo, um número menor de camadas pode ter como consequência valores fora do toleranciamento permitido pela norma. Todos os provetes foram medidos após a sua impressão para se verificar a conformidade com o toleranciamento explícito na norma, sendo que os que não respeitavam estes limites foram descartados.

- Repetibilidade ** - Todos os provetes de cada série têm que ser iguais. A melhor maneira de assegurar isto é imprimir todos com o mesmo GCode. Contudo, após serem definidas satisfatoriamente os parâmetros da impressão, facilmente se podem criar novos GCodes para otimizar o processo através da impressão simultânea de vários provetes num só momento de impressão. Foram feitas várias tentativas para essa otimização, sendo que em todas se assegurou que os provetes feitos com GCodes diferentes eram idênticos.
- Tempo de impressão * - É de todo o interesse que a impressão leve o menos tempo possível a executar. Contudo, a aceleração do processo tem que ser feita de modo a não comprometer a integridade das peças e a igualdade entre as mesmas. Para tal, analisou-se o papel da velocidade de impressão em cada parametrização, pelo que esta foi aumentada quando possível desde que isso não compromettesse a qualidade da impressão.

Impostos os objetivos desejados para a impressão dos provetes, decidiu-se reduzir a variabilidade das diferentes parametrizações ao mínimo necessário, para evitar as complicações relativas à supramencionada interação entre parâmetros. Para tal, decidiu-se definir como parâmetros a regular as seguintes variáveis:

- T_e – temperatura do extrusor (°C): Temperatura a que o material é aquecido e depositado.
- T_{bp} – temperatura do *buildplate* (°C): Temperatura da placa base onde a impressão ocorre.
- v – velocidade do extrusor (mm/s): Velocidade a que o extrusor se desloca enquanto deposita o material em cada camada.
- r – retração (mm): Distância que o extrusor sobe para se deslocar enquanto não deposita material.
- N_b – número de linha de *brim*: Número de linhas que compõem a aba que pode ser programada para promover a adesão do material.

É nestes parâmetros que todas as impressões variaram, tendo-se mantido outros parâmetros inalterados. As impressões levadas a cabo serão, por isso, caracterizadas e diferenciadas com base no conjunto destes valores. No geral, em impressão 3D, é comum fazerem-se variar também a espessura da camada e a quantidade de material para se obterem melhores resultados. Contudo,

por razões já explicitadas, os valores para estes dois parâmetros foram mantidos em 0.2 mm e 100%, respetivamente, em todas as impressões (Figs. 5.4 e 5.5).

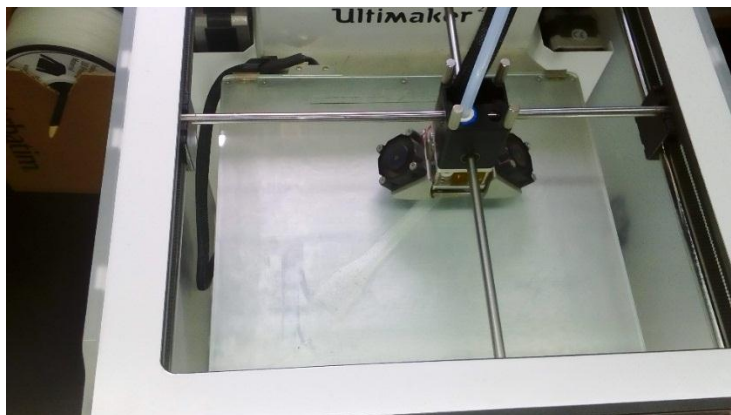


Figura 5. 4 Impressão dos provetes da série 0°/90°

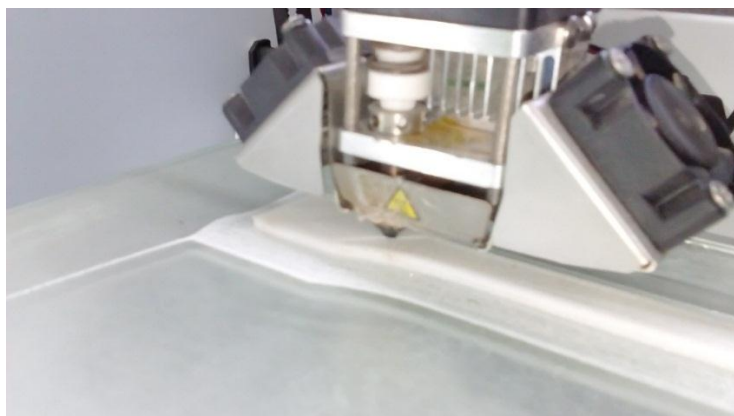


Figura 5. 5 Impressão dos provetes da série -45°/45° (pormenor)

Cada um dos conjuntos de parâmetros foi testado para os dois tipos de provetes (Figura 5.5). Como será possível observar, o tipo de provetes com a deposição de material orientada em ângulos de 0°/90° provou-se mais fácil de imprimir que o de -45°/45°. Especula-se que isto se deva à maneira como ambos os tipos de provetes arrefecem enquanto estão a ser impressos. A direção segundo a qual o material contrai enquanto arrefece provoca mais facilmente descolamento da peça com a configuração -45°/45°, visto que nestes provetes o material é depositado obliquamente em relação aos vértices das abas dos provetes, a primeira zona a descolar em todos os casos.

Um dos problemas iniciais do processo de impressão em nylon foi a alimentação do fio à impressora: o filamento é encaminhado da bobina para o extrusor por meio de um sistema rolamento + engrenagem que aperta o material e lhe confere a velocidade adequada face à velocidade de impressão escolhida. Visto que o filamento de nylon é consideravelmente mais

elástico que os de ABS e PLA (os mais frequentemente utilizados na impressora em questão), o mecanismo de encaminhamento do filamento teve que ser ajustado ao novo filamento. Isto levou a um moroso processo iterativo de calibração em que o mecanismo de alimentação do filamento era apertado e a impressão era reiniciada cada vez que o filamento escapava de entre o rolamento e a engrenagem motriz. Enquanto que foi arranjado um bom nível de aperto a conferir ao mecanismo, este ainda falhou esporadicamente durante impressões posteriores, pelo que se pensa que a resolução do problema passará pelo redesenho do próprio mecanismo (ele próprio impresso em PLA pelo responsável do FabLab).

Serão seguidamente explicitadas e comentadas as tentativas de impressão levadas a cabo (Tabela 5.1), acompanhadas pela razão que falharam, diferenciadas pelos parâmetros utilizados. O primeiro método de adesão testado implicou cobrir a placa de impressão de vidro da Ultimaker2 com uma camada de cola de tubo UHU. Este método é uma técnica comum, utilizada para promover a aderência da peça a ser impressa à plataforma.

Tabela 5. 1 Conjunto de parâmetros de impressão I, II e III

I	$T_e = 240^{\circ}\text{C}$	Tempo: 17min - A peça descolou da plataforma.	II	$T_e = 245^{\circ}\text{C}$	Tempo: 27min - A peça descolou da plataforma.	III	$T_e = 250^{\circ}\text{C}$	Tempo: 56min - A peça descolou parcialmente da plataforma. - A peça foi deformada.
	$T_{bp} = 50^{\circ}\text{C}$			$T_{bp} = 60^{\circ}\text{C}$			$T_{bp} = 60^{\circ}\text{C}$	
	$v = 25\text{mm/s}$			$v = 25\text{mm/s}$			$v = 30\text{mm/s}$	
	$r = 4\text{mm}$			$r = 3\text{mm}$			$r = 3\text{mm}$	
	$N_b = 0$			$N_b = 0$			$N_b = 15$	
	Adesão: cola UHU			Adesão: cola UHU			Adesão: cola UHU	

Enquanto que o aumento das temperaturas do extrusor e do *buildplate* promoveu uma melhor aderência da peça, a cola UHU mostrou-se incapaz de lidar com as tensões internas da peça durante a impressão. A adição de um *brim* à impressão da peça foi bastante vantajosa mas insuficiente, tendo em conta que o descolar parcial da peça durante a impressão levou à deformação da mesma. Para eliminar o problema da falta de adesão da peça ao *buildplate*, passou-se a utilizar um *spray* de aderência especializado para ser utilizado neste tipo de situações.

Verificou-se que a retração do extrusor em nada contribuiu para a execução da peça.

Tabela 5. 2 Conjunto de parâmetros de impressão IV e V

IV	$T_e = 250^\circ\text{C}$	Tempo: 70min - A peça descolou pouco da plataforma. - A peça foi deformada. - A humidade afetou a peça	V	$T_e = 255^\circ\text{C}$	Tempo: 63min - A peça foi deformada. - GCode problemático. (- Foi possível imprimir os provetes $0^\circ/90^\circ$ com esta parametrização.)
	$T_{bp} = 60^\circ\text{C}$			$T_{bp} = 70^\circ\text{C}$	
	$v = 30\text{mm/s}$			$v = 45\text{mm/s}$	
	$r = 0\text{mm}$			$r = 0\text{mm}$	
	$N_b = 15$			$N_b = 15$	
	Adesão: laca			Adesão: laca	

A adição do *spray* de aderência para substituir a cola mostrou-se uma boa decisão. Descobriu-se que o aumento da velocidade de impressão aliado ao aumento de temperaturas era vantajoso, visto que a peça arrefece menos durante a impressão o que leva a que descole da plataforma cada vez mais tarde na sua execução. O material teve que ser novamente seco com recurso ao forno durante os ensaios da parametrização IV (Tabela 5.2), visto que já estava há demasiado tempo exposto às condições ambiente. O GCode da parametrização do teste V teve que ser alterado pois a trajetória do extrusor fazia com que queimasse sistematicamente a zona de medição dos provetes, tornando-os inutilizáveis. Adicionalmente, a parametrização V mostrou-se adequada na impressão dos provetes $0^\circ/90^\circ$, mas para aumentar o grau de fiabilidade dos resultados dos testes da norma decidiu-se que ambas as séries seriam impressas com a mesma parametrização, se possível.

Tabela 5. 3 Conjunto de parâmetros de impressão VI e VII

VI	$T_e = 255^\circ\text{C}$	Tempo: 58min. - As peças foram impressas satisfatoriamente.	VII	$T_e = 255^\circ\text{C}$	Tempo: 45min. - As peças foram impressas satisfatoriamente
	$T_{bp} = 80^\circ\text{C}$			$T_{bp} = 70^\circ\text{C}$	
	$v = 55\text{mm/s}$			$v = 70\text{mm/s}$	
	$r = 0\text{mm}$			$r = 0\text{mm}$	
	$N_b = 15$			$N_b = 15$	
	Adesão: laca			Adesão: laca	

A parametrização VI (Tabela 5.3) conseguiu imprimir ambas as séries de provetes satisfatoriamente, pelo que se investigou se um aumento de velocidade podia ser feito para que a execução das peças fosse mais rápida. Por fim, achou-se que a parametrização VII conseguia um bom compromisso entre uma impressão adequada e mais rápida.

Os provetes foram impressos com a formatação VII e analisados para a verificação do dimensionamento e toleranciamento, mostrando-se dentro do exigido pela norma.

5.1.4 Procedimento experimental

Os ensaios de tração da norma ISO 527 foram realizados no Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da FCT/UNL. O procedimento adotado na execução dos ensaios foi o exigido pelo capítulo 9 da norma. As condições atmosféricas em que ocorreram os ensaios foram sensivelmente as mesmas segundo as quais os provetes foram conservados a 23°C e a 50% de humidade relativa (condições ambiente).

A zona de amarração e a zona de medição dos provetes foram marcadas a caneta sobre os provetes para facilitar a montagem experimental. As medições efetuadas antes dos ensaios foram feitas em todos os ensaios nos três sítios necessários: no centro do provete e a 5mm de cada extremo da zona de medição (Figuras 5.6, 5.7 e 5.8). A seguinte imagem explicita e numera as posições medidas:

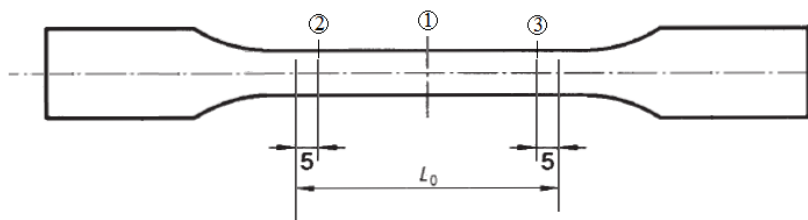


Figura 5. 6 Posições de medição no provete para a confirmação de toleranciamentos

De acordo com a numeração definida na imagem, estão seguidamente tabeladas as medições efetuadas para as variáveis de largura (b) e espessura (h) nas três posições, bem como a média aritmética de cada valor:

Tabela 5. 4 Medições de tolerancimento dos provetes da série -45°/45°

Série -45°/45°									
Provete 1		Provete 2		Provete 3		Provete 4		Provete 5	
h_1	4.01mm	h_1	4.00mm	h_1	4.00mm	h_1	4.01mm	h_1	4.00mm
h_2	4.01mm	h_2	4.01mm	h_2	4.01mm	h_2	4.00mm	h_2	4.00mm
h_3	4.02mm	h_3	4.00mm	h_3	4.00mm	h_3	4.00mm	h_3	4.00mm
\bar{h}	4.01mm	\bar{h}	4.00mm	\bar{h}	4.00mm	\bar{h}	4.00mm	\bar{h}	4.00mm
b_1	10.0mm	b_1	10.1mm	b_1	10.1mm	b_1	10.0mm	b_1	10.1mm
b_2	10.1mm	b_2	10.1mm	b_2	10.0mm	b_2	10.0mm	b_2	10.0mm
b_3	10.1mm	b_3	10.0mm	b_3	10.0mm	b_3	10.0mm	b_3	10.0mm
\bar{b}	10.1mm	\bar{b}	10.0mm	\bar{b}	10.0mm	\bar{b}	10.0mm	\bar{b}	10.0mm

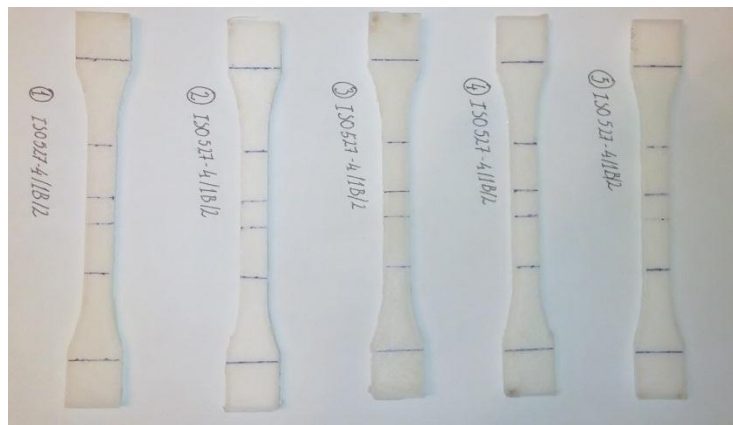


Figura 5. 7 Série de provetes -45°/45°

Tabela 5. 5 Medições de toleranciamento dos provetes da série 0°/90°

Série 0°/90°									
Provete 1		Provete 2		Provete 3		Provete 4		Provete 5	
h_1	4.00mm	h_1	4.00mm	h_1	4.00mm	h_1	4.02mm	h_1	4.01mm
h_2	4.00mm	h_2	4.00mm	h_2	4.01mm	h_2	4.00mm	h_2	4.00mm
h_3	3.99mm	h_3	4.00mm	h_3	4.00mm	h_3	4.01mm	h_3	4.01mm
\bar{h}	4.00mm	\bar{h}	4.00mm	\bar{h}	4.00mm	\bar{h}	4.01mm	\bar{h}	4.01mm
b_1	10.0mm	b_1	10.1mm	b_1	10.0mm	b_1	10.1mm	b_1	10.0mm
b_2	10.0mm	b_2	10.0mm	b_2	10.2mm	b_2	10.0mm	b_2	10.1mm
b_3	10.1mm	b_3	10.0mm	b_3	10.1mm	b_3	10.0mm	b_3	10.0mm
\bar{b}	10.0mm	\bar{b}	10.0mm	\bar{b}	10.1mm	\bar{b}	10mm	\bar{b}	10.0mm



Figura 5. 8 Série de provetes 0°/90°

Todos os provetes utilizados estavam dentro dos toleranciamentos dimensionais exigidos na norma. Mais uma vez, é evidenciado neste contexto uma das grandes vantagens da impressão 3D: uma impressão bem parametrizada e adequada ao material resulta em peças finais em que todas as dimensões do modelo de CAD são reproduzidas fidedignamente. Especula-se que os pequenos desvios vestigiais sejam consequência da resolução escolhida e de pequenas deformações internas inerentes ao processo de arrefecimento da peça, aliadas ao nível de precisão exigido nas próprias medições.

Os provetes foram fixos nas amarras da máquina servohidráulica MTS (Figura 5.9) sem que houvesse fratura nem ocorresse escorregamento dos mesmos. O extensômetro MTS foi

montado na zona de medição com o auxílio de dois pequenos calços e de molas sem que houvesse visível indentação dos provetes. Segue uma fotografia do aspeto final da montagem experimental.

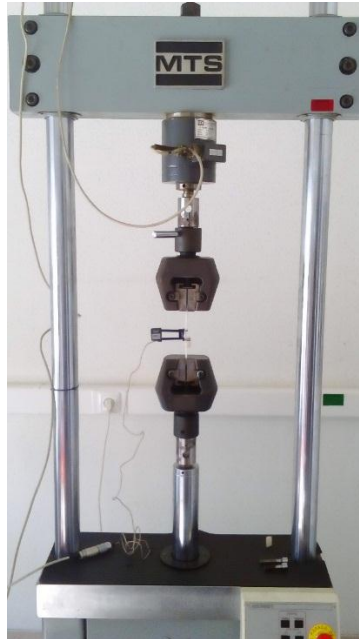


Figura 5. 9 Montagem experimental para o teste de provetes

Os provetes foram tracionados até ao comprimento máximo possível da máquina de ensaios, tendo sido registados o tempo de ensaio (em segundos), a força (em kN), o aumento de distância entre a zona das amarras e o aumento de comprimento da zona de medição pelo extensómetro (ambas em mm).

5.1.5 Resultados

Todos os provetes foram tracionados até mais do dobro do tamanho inicial, tendo a grande maioria suportado uma deformação axial superior a 120%, como foi possível concluir através da análise das extensões. As fórmulas utilizadas no cálculo e consequente representação gráfica dos valores da tensão e da extensão, foram as presentes no capítulo 10 da primeira parte da norma ISO 527:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad ; \quad \varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

Tomando as variáveis dimensionais os valores da área transversal da zona de medição e do comprimento de medição do extensómetro:

$$A = 40 \text{ mm}^2 \Rightarrow \sigma = \frac{F}{40} \text{ [MPa]}$$

$$L_0 = 22.5 \text{ mm} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta L_0}{22.5}$$

(Nota: Estes valores são ligeiramente diferentes para os provetes cuja média das medições feitas não foi exatamente 4.00 mm de espessura e 10.0 mm de largura)

Segue a representação gráfica das curvas de tensão/extensão de cada série, estando os resultados para cada um do provetes em anexo neste relatório (Figuras 5.10 e 5.11).

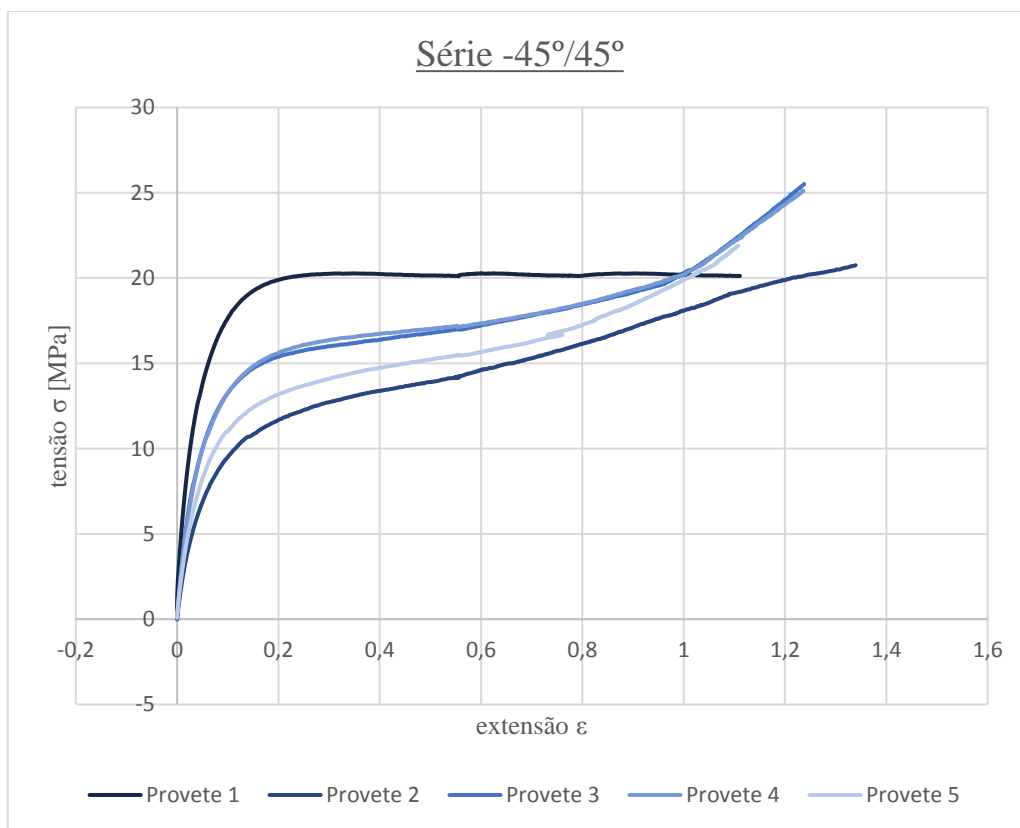


Figura 5. 10 Curvas de tensão/extensão para os provetes da série -45°/45

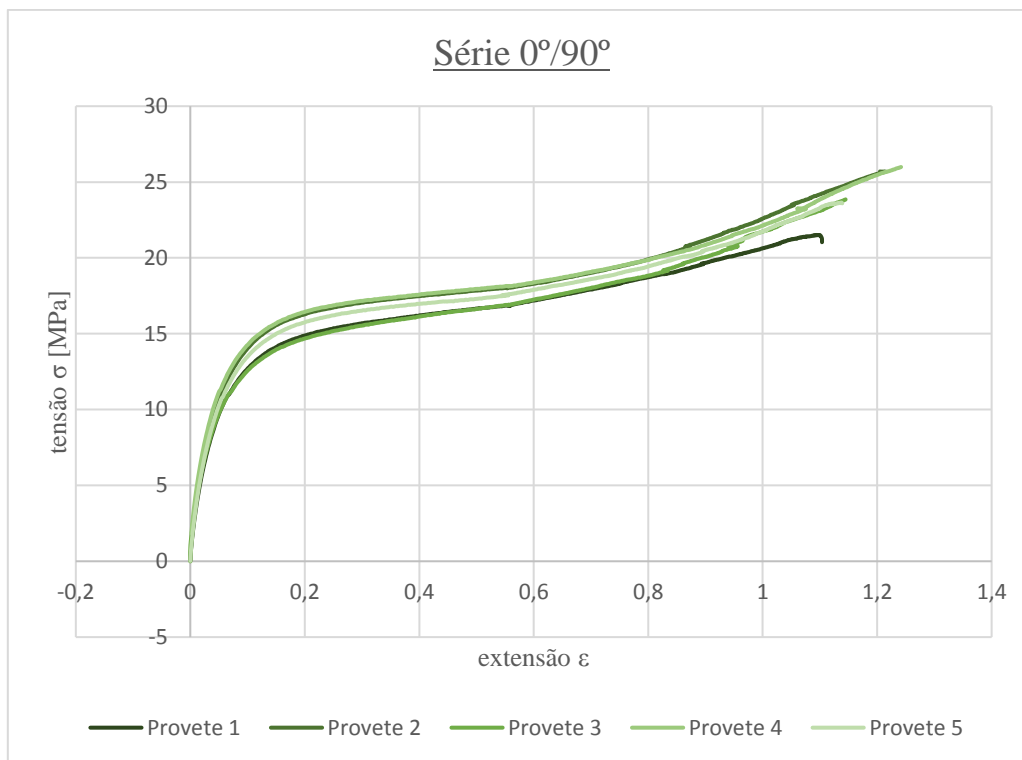


Figura 5. 11 Curvas tensão/extensão para os provetes da série 0°/90°

A norma ISO 527 no capítulo 4 informa que, num cálculo do Módulo de Young baseado no registo computacional dos valores de deslocamento e força, a fórmula fornecida no capítulo 10 pode ser substituída por uma regressão linear dos valores da curva de tensão/extensão compreendidos entre os limites de $\epsilon_1 = 0.0005$ e $\epsilon_2 = 0.0025$. O declive da recta resultante da regressão linear deve ser registado como o valor do Módulo de Young para um dado provete. O valor do módulo de Young registado para cada provete, bem como a média de cada série são apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5. 6 Resultados experimentais para os valores do módulo de Young para as duas séries de provetes

<u>Série -45°/45°</u>		<u>Série 0°/90°</u>	
Nº do provete	Módulo de Young E_t [MPa]	Nº do provete	Módulo de Young E_t [MPa]
1	520.22	1	466.77
2	268.24	2	507.96
3	418.28	3	533.54
4	407.68	4	392.19
5	380.33	5	476.59
\bar{X}_1	398.95	\bar{X}_2	475.91

5.2 Teste de subcomponentes

5.2.1 Objetivo

O ensaio experimental descrito nesta parte do relatório integra-se no domínio do teste de subcomponentes do método de *building blocks*. O objetivo deste tipo de testes passa pela fundamentação de conhecimento já adquirido em testes de complexidade inferior, em que a aferição das propriedades mecânicas do material já foi feita, e se analisam aspetos particulares da geometria da peça e do comportamento estrutural do material.

O objeto de estudo neste ensaio foi um reservatório esférico, cujas principais dimensões e geometria foram retirados do reservatório de água de motor da VW. Foi impresso em Nylon 6 a metade da escala das dimensões originais. A característica estudada no ensaio do reservatório foi o seu comportamento de expansão quando sujeito a uma pressão interna uniforme.

O comportamento real do reservatório foi comparado com as simulações obtidas através do Método de Elementos Finitos baseado nas propriedades mecânicas obtidas nos ensaios dos provetes.

Têm-se como os principais objetivos do ensaio de subcomponentes:

1. A análise do processo de impressão do reservatório em Nylon 6 e a adequação do processo de impressão 3D a este tipo de componente;
2. A análise da estanquidade do material;
3. A verificação da aplicabilidade dos dados obtidos nos testes de propriedades mecânicas;
4. A adequação dos métodos analíticos à realidade do material;
5. A investigação da expansão do Nylon-6 quando sujeito a pressão interna, através da posição do ponto de deslocamento máximo no reservatório.

Esta fase do método de testes por *building blocks* pretende a avaliação do comportamento do material em características individualizadas do seu modo de serviço. O tipo de ensaio levado a cabo seria necessário no projeto de um reservatório pressurizado a fabricar por impressão 3D, para a análise exclusiva do modo de deformação consoante as solicitações de serviço e possíveis falhas. Foi também verificada a estanquidade do material, tendo em conta os possíveis defeitos e falhas que podem ocorrer durante a impressão

5.2.2 Modelação e impressão do reservatório

O reservatório sob estudo neste ensaio foi modelado com as dimensões de diâmetro e espessura de um reservatório de água do radiador comum na marca Volkswagen. Tendo em conta o propósito já explicitado do teste, todos os outros componentes do reservatório original foram ignorados. Foram acrescentados ao modelo de CAD dois canais para a circulação do ar necessária para o ensaio. Foi também acrescentado um anel de material no hemisfério oposto ao das entradas de ar para que o reservatório pudesse ser mantido na mesma posição durante o ensaio (Figura 5.12).

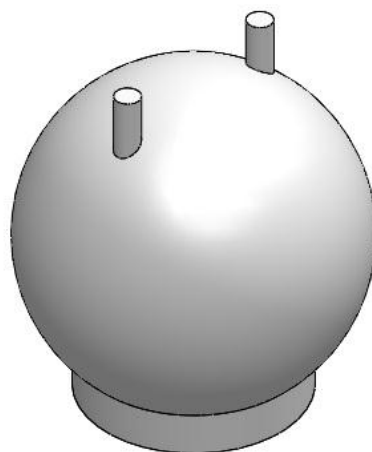


Figura 5. 12 Modelo CAD utilizado na impressão do reservatório (SolidWorks)

A impressão do reservatório foi feita em empresa externa. O software de pré-processamento utilizado foi a versão 15.04.6 do Cura (Figura 5.13). O modelo em CAD foi lido pelo Cura sob o formato .stl e todas as medidas em todas as direções do modelo em tamanho real foram reduzidas para metade. A impressão de um modelo do reservatório a uma escala reduzida foi feita com o objetivo de simular a situação pretendida a uma menor escala, sendo de notar a grande facilidade em gerir os modelos neste aspeto através do método de impressão 3D. Seria também impossível imprimir um modelo à escala real, tendo em conta que este teria um diâmetro de quase 140 mm, tornando-o demasiado grande para ser impresso em qualquer uma das impressoras disponíveis.

A impressora utilizada na impressão do reservatório é do modelo μ delta, da marca RepRap (Figura 5.14). A parametrização para a impressão do reservatório foi feita com recurso às mesmas variáveis definidas na impressão dos provetes. O reservatório foi impresso com o seguinte conjunto de parâmetros:

- $T_e = 255^\circ\text{C}$
- $T_{bp} = 100^\circ\text{C}$
- $v = 30 \text{ mm/s}$
- $r = 0 \text{ mm}$
- $N_b = 0$
- Adesão: cola PVA

Segundo a orientação escolhida para a impressão do reservatório, a base fez contacto com a plataforma de impressão, ficando as entradas de ar no hemisfério superior da peça aquando da impressão. Esta orientação permitiu que a peça fosse impressa simetricamente em ambos os eixos da plataforma de impressão, o que demonstrou facilitar o processo de impressão. Adicionalmente, a impressão do reservatório foi feita com recurso ao suporte das camadas da parte esférica do reservatório com um ângulo mais baixo, para que o material nestas fatias fosse depositado em contacto com matéria sólida evitando a deformação da peça. O suporte foi também programado no Cura.

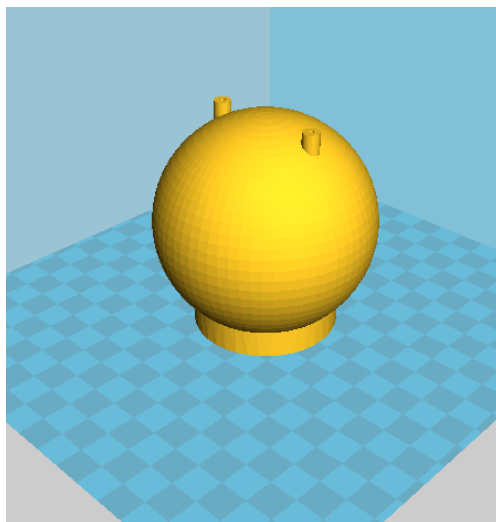


Figura 5. 13 Modelo CAD do reservatório no Cura

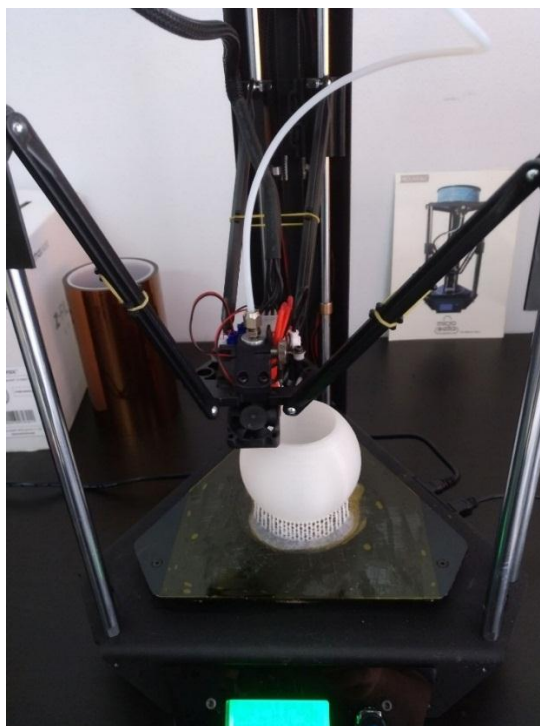


Figura 5. 14 Impressão do reservatório

Das três instâncias de impressão 3D com Nylon 6 utilizadas nos ensaios da presente tese de mestrado, a impressão do reservatório provou-se ser a menos problemática. Os problemas significativos da falta de adesão à base de impressão que ocorreram na impressão dos provetes (e, mais tarde, na impressão do cabide) praticamente não se fizeram sentir na impressão do reservatório, tendo a parametrização da mesma sido relativamente fácil quando acompanhada pelas técnicas aprendidas com a impressão dos provetes. O facto de se tratar de um objeto de secção transversal circular e a simetria inerente a esta característica tornaram a impressão pouco

problemática e fácil de tratar, provavelmente devido à sintonia que a geometria da peça conferiu às tensões internas da peça que advêm da deposição do material e do arrefecimento da peça.

5.2.3 Simulação numérica do reservatório pressurizado

O ensaio experimental do reservatório foi simulado através do Método de Elementos Finitos, nos softwares *SolidWorks Simulation* e *Nastran*, integrados nos softwares de modelação *SolidWorks* e *Solid Edge*, respetivamente. O modelo do reservatório elaborado para a impressão foi o mesmo utilizado nas simulações. A caracterização do material foi feita através da ferramenta de edição de modelos de material em cada software, onde foram inseridos os dados sobre as propriedades mecânicas do Nylon-6, aferidas nos testes de propriedades mecânicas, para a série de provetes 0°/90°. As propriedades do material definidas para as simulações foram, portanto (Tabelas 5.7 e 5.8):

- Módulo de Young: 475.396 MPa (média aritmética dos provetes da série 0°/90°)
- Tensão de cedência: 15 MPa (estimativa feita de acordo com as diretivas da norma)
- Coeficiente de Poisson: 0.4 (da tabela de propriedades do material)
- Densidade do material: 1020 kg/m³ (da tabela de propriedades do material)

Tabela 5. 7 Caracterização do material na simulação (*SolidWorks*)

Property	Value	Units
Elastic Modulus	475.396	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.394	N/A
Shear Modulus	318.9	N/mm ²
Mass Density	1020	kg/m ³
Tensile Strength	30	N/mm ²
Compressive Strength		N/mm ²
Yield Strength	15	N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient		/K
Thermal Conductivity	0.2256	W/(m·K)
Specific Heat	1386	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

Tabela 5. 8 Caracterização do material na simulação (*Solid Edge*)

Propriedades			
Nome da Propriedade	Valor	Excluir ...	Editar...
Densidade	1020,000 kg/m ³		
Coef. Exp. Térmica	0,0000 /C		
Condutividade Térmica	0,002 kW/m-C		
Calor Específico	1675,000 J/kg-C		
Módulo de Elasticidade	475,396 MegaPa		
Coeficiente de Poisson	0,400		
Tensão de Deformação	15,000 MegaPa		
Tensão Máxima	0,000 MegaPa		
Alongamento %	0,000		

À semelhança do ensaio experimental, o ponto cujo deslocamento foi monitorizado foi o ponto de deslocamento máximo, localizado no polo superior da parte esférica do reservatório (Figura 5.15), tendo em conta as condições fronteira definidas na Figura 5.16.

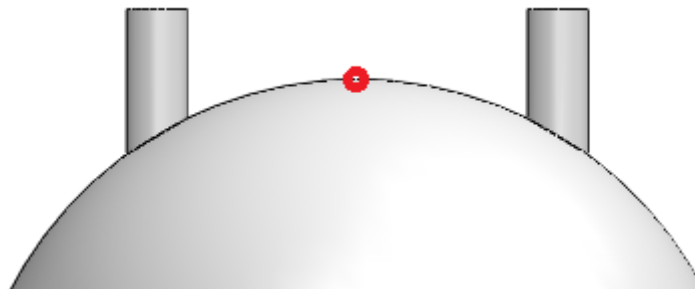


Figura 5. 15 Ponto de medição de deslocamento radial

Como *input* de condições fronteira, o modelo foi constrangido na orla da base circular, onde não foram permitidos deslocamentos nem rotações, à semelhança do que se procurou fazer no ensaio.

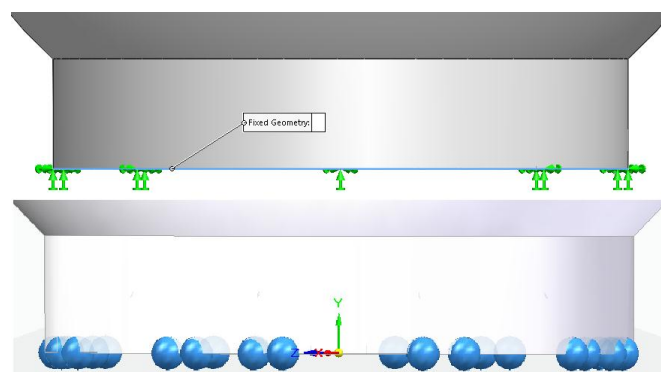


Figura 5. 16 Condições fronteira aplicadas ao reservatório em *SolidWorks* e *Solid Edge*

Foram testadas três pressões internas diferentes, expressas em milímetros de coluna de mercúrio (mmHg), à semelhança da escala do esfigmomanômetro utilizado no ensaio. As três pressões internas testadas nas simulações (Figura 5.17) e nos ensaios foram:

- $p_1 = 200 \text{ mmHg} \approx 26\,664.47 \text{ Pa}$
- $p_2 = 250 \text{ mmHg} \approx 33\,330.59 \text{ Pa}$
- $p_3 = 300 \text{ mmHg} \approx 39\,996.71 \text{ Pa}$

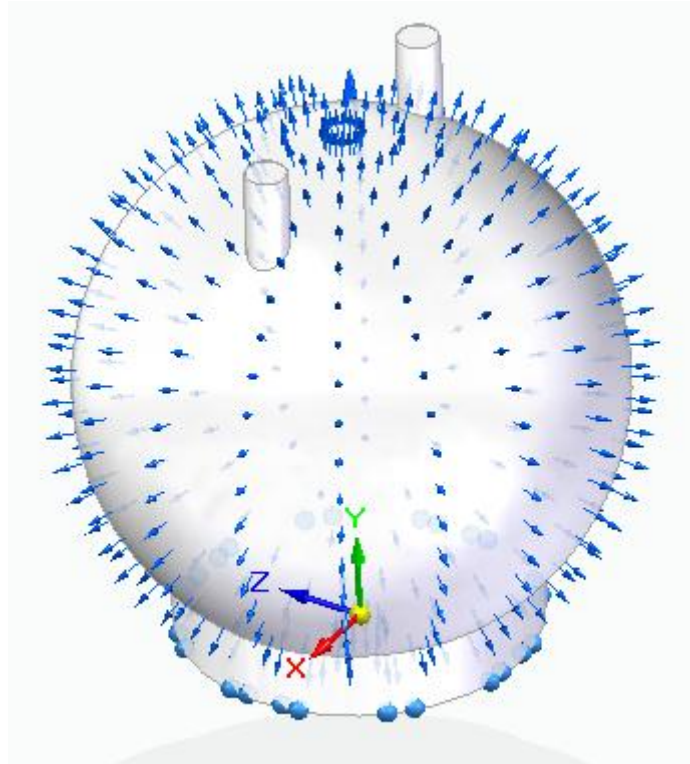


Figura 5. 17 Aplicação de pressão interna na simulação em Nastran

Os resultados obtidos nas simulações para o deslocamento radial vertical do ponto em estudo juntamente com os valores teóricos obtidos com a fórmula retirada de *Ugural, 1999* foram, para cada uma das pressões, os apresentados na Tabela 5.9:

Tabela 5. 9 Valores para o deslocamento radial do ponto de medição do reservatório nas simulações

Pressão	Deslocamento radial máximo [mm]		Deslocamento radial teórico [mm]
	<i>SolidWorks Simulation</i>	<i>Nastran</i>	$\frac{p \cdot r^2}{Et} (1 - \nu)$
p_1	2.018×10^{-2}	1.97×10^{-2}	2.367×10^{-2}
p_2	2.522×10^{-2}	2.46×10^{-2}	2.908×10^{-2}
p_3	3.03×10^{-2}	2.96×10^{-2}	3.49×10^{-2}

5.2.4 Procedimento experimental

O ensaio experimental ao reservatório foi feito com recurso à seguinte lista de material:

- Reservatório em impresso em Nylon 6
- Base magnética
- Esfigmomanómetro
- Pompete manual
- 2 tubos de borracha
- Comparador + suporte

O procedimento experimental para o ensaio do reservatório desenvolveu-se de acordo com os seguintes passos:

- a. Fixação da base do reservatório à base magnética;
- b. Ligação de uma das entradas de ar do reservatório à pompete por meio de um dos tubos de borracha;
- c. Ligação da outra entrada de ar do reservatório ao esfigmomanómetro por meio do outro tubo de borracha;
- d. Posicionamento do comparador no ponto de medição (polo superior da parte esférica do reservatório), normal à superfície da esfera;
- e. Pressurização do reservatório por via manual até 200 mmHg e registo do valor do comparador;
- f. Acréscimo de pressão até 250 mmHg e registo do valor do comparador;
- g. Acréscimo da pressão até 300 mmHg e registo do valor do comparador;
- h. Despressurização do reservatório.

É seguidamente apresentado o aspeto da montagem experimental (Figura 5.18):

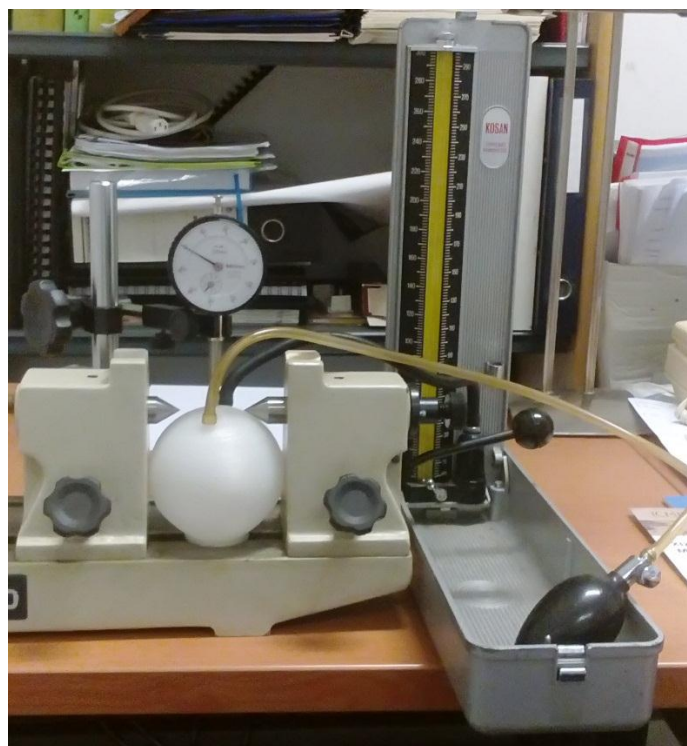


Figura 5. 18 Montagem experimental para o ensaio de subcomponente

O ensaio foi repetido três vezes, tendo todos os valores de deslocamento sido registados em Excel.

5.2.5 Resultados

Os valores de deslocamento do ponto de medição variaram num total de aproximadamente 0.01mm. Os deslocamentos do ponto de medição evidenciados pelo comparados encontram-se seguidamente tabelados, em conjunto com a média dos três ensaios.

Tabela 5. 10 Valores experimentais para o deslocamento radial no ponto de medição

Pressão	Deslocamento do ponto de medição [mm]			
	1ª medição	2ª medição	3ª medição	Média
p_1	0.005	0.006	0.005	0.005
p_2	0.010	0.012	0.011	0.011
p_3	0.014	0.015	0.017	0.0153

Foi feita a representação gráfica dos valores médios do ensaio experimental e dos resultados obtidos em cada uma das simulações, sendo um gráfico composto das três vertentes do ensaio seguidamente apresentados (Figura 5.19).

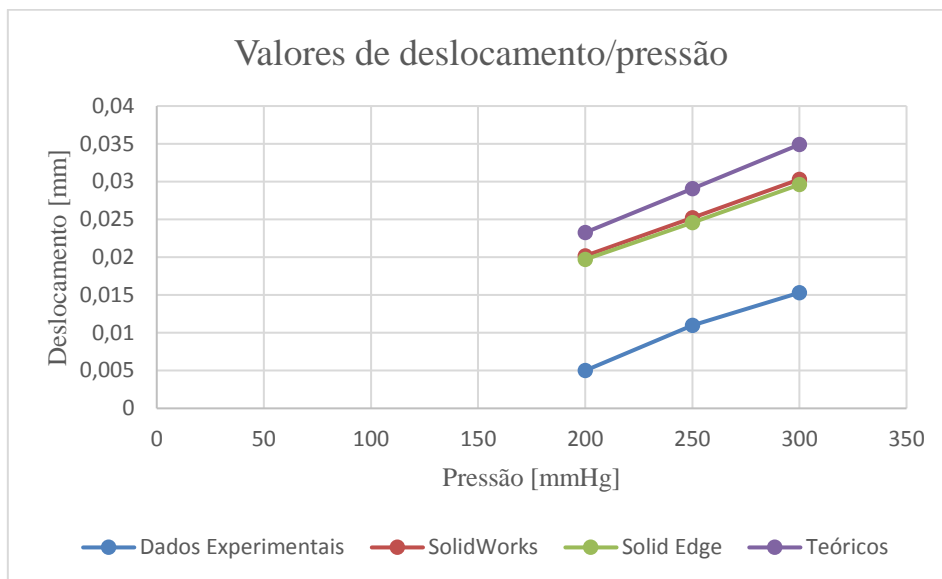


Figura 5. 19 Representação gráfica dos valores de deslocamento do ponto de medição

5.3 Teste de componentes

5.3.1 Objetivo

No ensaio do componente descrito nesta parte do relatório, procurou-se analisar o desempenho estrutural do Nylon 6 utilizado em impressão 3D num componente com fim prático, integrando os testes realizados no domínio dos ensaios de componentes presente no penúltimo nível de complexidade do método de *building blocks*.

O componente testado trata-se de uma adaptação de um dos modelos de cabide presentes no cockpit de um avião ATR 72, série 500 (Figura 5.20). A escolha do componente baseou-se na opção por um componente já existente e utilizado na indústria aeronáutica, para que ilações tiradas dos ensaios resultantes tenham um termo real de comparação. O componente foi modelado a partir de uma fotografia dos cabides resultante de uma pesquisa informática, com recurso a software de dimensionamento. Não se garante, por isso, que todas as dimensões do modelo obtido sejam perfeitamente iguais ao do acessório, mas foi feito um esforço para que as dimensões principais fossem respeitadas.

Os principais objetivos a cumprir em todo o processo do ensaio de componente realizado foram definidos como:

1. A análise das principais características e dificuldades do processo de impressão de um componente em Nylon 6.
2. A definição do comportamento à deflexão do cabide, quando sujeito à força de massas calibradas num ponto crítico.
3. A comparação do comportamento à deflexão do cabide com os resultados obtidos em simulações numéricas do modelo sujeito ao mesmo tipo de carregamento.
4. O melhoramento do modelo original, facilitado pelas características do método de impressão 3D.

O tipo de ensaio e os objetivos definidos para o mesmo foram elaborados consoante as características e funcionalidade dos ensaios de componentes do método de *building-blocks*. Nesta fase do método, os testes ao material avaliam as suas capacidades estruturais numa reprodução das condições de serviço e respetivas solicitações de carga, com a função de analisar o comportamento mecânico da peça numa situação real. Este nível de complexidade é o penúltimo na cadência de testes do método, estando principalmente preocupado com a avaliação dos modos de falha da peça em condições de serviço e com a adequação e melhoramento dos métodos analíticos utilizados para prever o comportamento da mesma.

5.3.2 Modelação e impressão do cabide

O modelo do cabide foi criado com recurso ao dimensionamento da peça original presente no cockpit do avião (Fig. 5.20). As dimensões do componente, retiradas da fotografia, foram medidas à escala, por comparação com as dimensões de outros componentes normalizados, originando um modelo em CAD 3D do cabide original (Fig. 5.21).

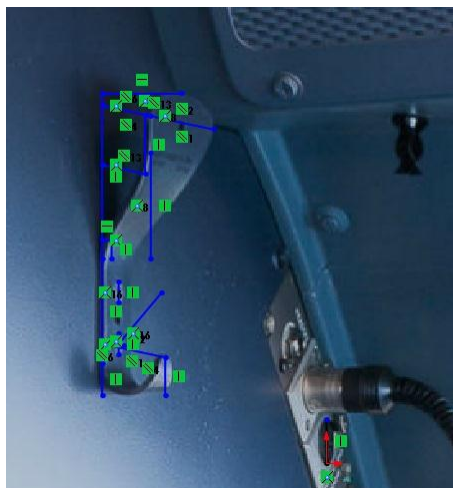


Figura 5. 20 Dimensionamento com recurso ao cabide existente

Considerou-se que os cabides originais eram feitos numa liga metálica leve, provavelmente numa liga de alumínio. Para aumentar a rigidez estrutural do cabide fabricado com o Nylon-6, decidiu-se acrescentar uma nervura axial ao modelo original do cabide (Figura 5.21). Esta alteração tem como objetivo mitigar a flexão da aba superior quando está sob carga. É de notar que, se o objetivo fosse produzir os cabides por qualquer outro método de fabrico, esta alteração envolveria o repensar de grande parte do processo de fabrico da peça. O recurso ao método de impressão 3D facilita este tipo de alterações visto que as torna necessárias somente na elaboração do modelo computacional.

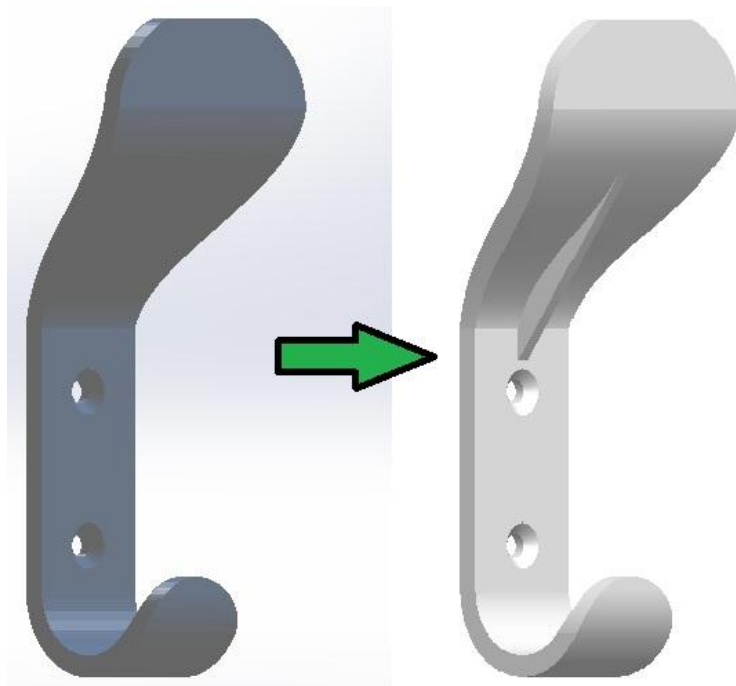


Figura 5. 21 Introdução do reforço no cabide

À semelhança do reservatório pressurizado, a impressão do cabide foi feita por entidade externa. O modelo de impressora utilizado na impressão do componente foi o Prusa i3 e o software de processamento de impressão foi novamente a versão 15.04.6 do Cura. As variáveis de impressão foram as mesmas que na impressão dos provetes, tendo o conhecimento adquirido neste contexto sido empregue na impressão da peça. A parametrização com a qual se conseguiu imprimir o cabide com sucesso foi a seguinte.

- $T_e = 250^\circ\text{C}$
- $T_{bp} = 105^\circ\text{C}$
- $v = 40 \text{ mm/s}$
- $r = 0 \text{ mm}$
- $N_b = 10$
- Adesão: cola PVA

Verificou-se ser possível imprimir o cabide segundo duas orientações: na posição de serviço, sendo o gancho a única parte da peça a tocar na plataforma de impressão e com a parte lateral do cabide em contacto com a plataforma. Contudo, a orientação escolhida foi a de imprimir o cabide deitado com a parte lateral em contacto com a plataforma, como seguidamente ilustrado (Figura 5.22):

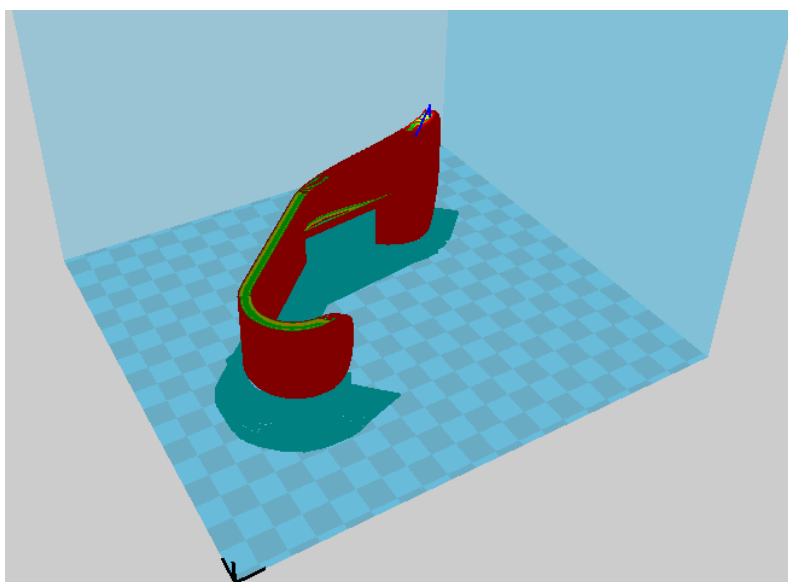


Figura 5. 22 Processamento do modelo CAD do cabide no Cura

À semelhança do que aconteceu na impressão dos provetes, mas ao contrário da impressão do reservatório, a principal dificuldade sentida nas tentativas de impressão do cabide foi a falta de aderência do material à plataforma de impressão. Nas tentativas de impressão

falhadas, o material começou a descolar progressivamente da plataforma num dado momento, induzindo distorção na peça final e inutilizando a impressão. Este foi também um dos aspetos que levou à decisão de imprimir a peça com a orientação definida, visto que uma menor área de material por camada e uma orientação constante das arestas de cada *slice* da peça levaram à diminuição das tensões internas na peça durante a impressão, permitindo que esta decorresse durante tempo suficiente antes do material descolar da plataforma.

A peça foi impressa com um *infill* de 50%, i.e., apenas 50% do seu interior foi preenchido de material (Figura 5.23), estando o espaço vazio organizado de forma quadrada e regular como acontece sempre, proporcionalmente, quando o *infill* não é de 100%. A decisão de imprimir a peça com estas características foi tomada com o objetivo de analisar o papel desta característica no desempenho estrutural da peça.

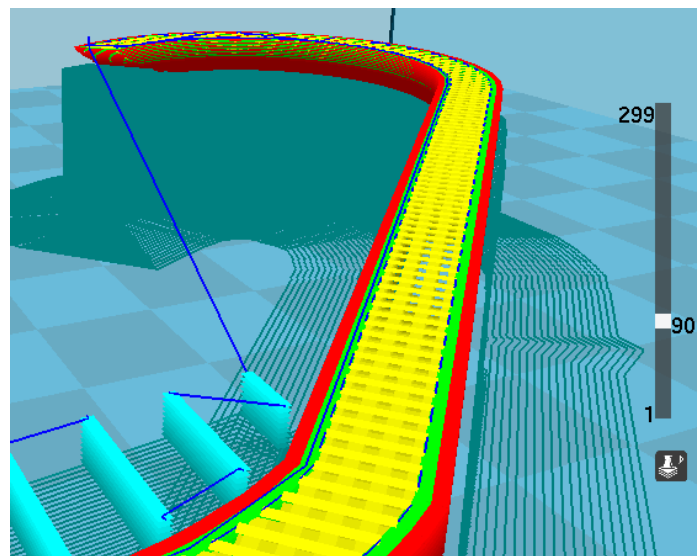


Figura 5. 23 Pormenor do *infill* do cabide no Cura a 50%

A possibilidade de regular este parâmetro de impressão nas peças projetadas para impressão permite estudar qual a quantidade de material necessária no interior da peça para que esta possa desempenhar a sua função, podendo ser atingidos equilíbrios entre a funcionalidade da peças e questões como o peso, a quantidade de material e o custo das mesmas, com consequências benéficas para os aspetos não estruturais da peça impressa.

5.3.3 Simulação

Uma das partes projetadas para os testes de componentes consiste na simulação por método de elementos finitos do procedimento experimental com recurso ao modelo de CAD do cabide. Os softwares de simulação utilizado no teste de componente foram o *Simulation* do *SolidWorks* e o *Nastran* do *Solid Edge*.

O mesmo ficheiro .stl utilizado na impressão da peça foi o mesmo utilizado nas simulações numéricas. A definição do material foi feita com base nos dados aferidos no ensaio de propriedades mecânicas com os provetes. As propriedades do material resultantes do ensaio dos cinco provetes da série 0°/90° foram os seguintes:

- Módulo de Young: 475.396 MPa
- Tensão de cedência: 15 MPa (estimativa feita de acordo com as diretivas da norma)
- Coeficiente de Poisson: 0.4 (da tabela de propriedades do material)
- Massa volúmica do material: 1020 kg/m³ (da tabela de propriedades do material)

A comparação entre as massas volúmicas do Nylon (1020 kg/m³) e de uma liga de Alumínio (2700 kg/m³) permite inferir uma redução de cerca de 60% do peso para o caso do cabide produzido em material polimérico quando comparado com o cabide produzido em material metálico. Esta substancial redução de massa é particularmente importante em aplicações a utilizar na indústria dos transportes.

Relativamente aos ensaios experimentais, a principal grandeza medida no teste de componentes foi o deslocamento máximo da peça quando sujeita a forças na zona mais solicitada a nível de tensões: a ponta da aba de cima do cabide (Figura 5.24).

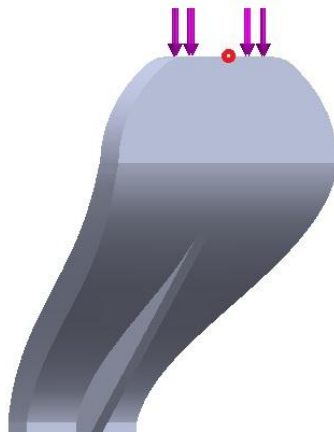


Figura 5. 24 Localização do ponto de medição e de aplicação de forças no cabide

Para simular a situação de solicitação mais crítica do cabide, as forças foram aplicadas no lado superior da aba do cabide. É fácil verificar que é nesta zona, que abrange também o ponto de medição de deslocamento, que a aplicação de uma força vertical induzirá o maior momento flector na aba. A aplicação da força nesta zona tem também como objetivo simular o uso corrente do cabide.

Como condições fronteira, restringiu-se qualquer deslocamento e rotação da zona dos furos escareados dos parafusos (Figura 5.25), visto que também é nestes pontos que a peça será constrangida durante o ensaio experimental.

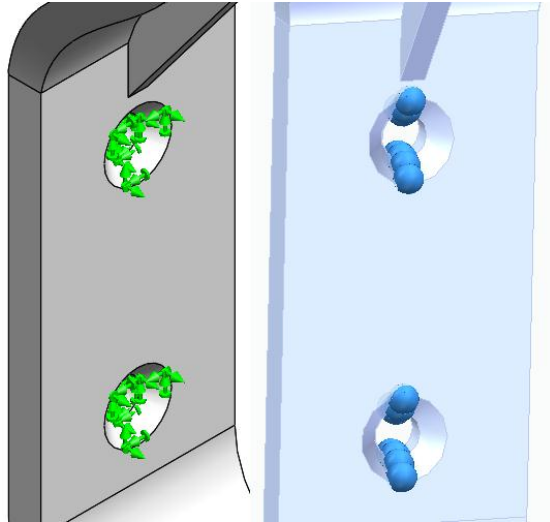


Figura 5. 25 Condições fronteira nas simulações do cabide em SolidWorks e Solid Edge

À semelhança do que se projetou para o ensaio experimental, foram executadas dezanove simulações em que se fez a força variar de entre 1N e 19N, em incrementos de 1N. Achou-se que este espectro de valores (sensivelmente compreendido entre 100g e 2 kg) emulava satisfatoriamente a gama de pesos passíveis de serem pendurados na aba grande do cabide em posição de serviço. A malha escolhida para as simulações em ambos os softwares foi de configuração tetraédrica e de densidade “fina”.

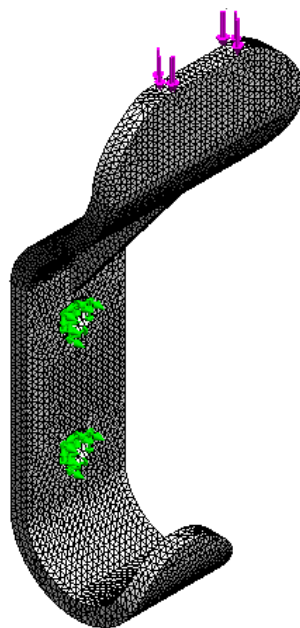


Figura 5. 26 Malha utilizada na simulação do cabide em *SolidWorks*

Após as simulações terem sido corridas os resultados obtidos para o deslocamento máximo do ponto, segundo o eixo dos yy, para cada um dos programas computacionais, foram os indicados na Tabela 5.11):

Tabela 5. 11 Valores dos deslocamentos verticais obtidos nas simulações para o ponto de medição

Força [N]	Deslocamento máximo dy [mm]	
	<i>SolidWorks</i>	<i>Solid Edge</i>
1	0,225	0,227
2	0,454	0,454
3	0,68	0,681
4	0,907	0,908
5	1,13	1,13
6	1,36	1,36
7	1,59	1,59
8	1,81	1,81
9	2,04	2,04
10	2,27	2,27
11	3,02	2,49
12	3,36	2,72
13	3,71	2,95
14	4,07	3,17
15	4,45	3,4
16	4,84	3,63
17	5,25	3,86
18	5,67	4,08
19	6,11	4,31

No caso das simulações realizadas em *SolidWorks Simulation*, para massas de valor igual ou superior a 1kg, as análises foram de tipo não linear, tendo sido permitidas grandes deformadas na aba do cabide. As análises realizadas em Nastran (*Solid Edge*) foram sempre tipo linear elástica.

5.3.4 Procedimento experimental

O ensaio experimental ao cabide envolveu a seguinte lista de materiais:

- Cabide com reforço impresso em Nylon-6
- 8 pesos calibrados em newton: 5x1N + 3x5N
- Suporte das massas + gancho
- 2 parafusos M5 + buchas
- Balança
- Craveira

A escolha do tipo de pesos permitiu que o ensaio avançasse em incrementos de 1N, como havia sido simulado em computador. O valor exato da massa de cada um dos pesos foi confirmado antes do início do procedimento experimental, sabendo que $1\text{N} \approx 101.97\text{g}$ e $5\text{N} \approx 509,86\text{g}$:

Tabela 5. 12 Valores de força para os pesos utilizados no ensaio de componente

Peso nº	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Suporte
Força [N]	1	1	1	1	1	5	5	5	1
Massa [g]	100	100	101	100	101	512	511	511	101

O procedimento experimental decorreu de acordo com os seguintes passos:

- a. Fixação do cabide na parede por meio de dois furos, dos parafusos e das buchas;
- b. Medição inicial da distância entre a posição do ponto de medição e o referencial;
- c. Colocação do suporte com as massas calibradas no ponto central do lado superior (1N);
- d. Medição do efeito de deflexão da força do peso através do deslocamento do ponto de medição e registo dos valores;
- e. Repetição dos passos c. a f. para valores entre 1N e 19N, em incrementos de 1N.
- f. Retirar do peso imposto no cabide;

A montagem experimental teve o aspeto evidenciado na seguinte imagem (Figura 5.27):



Figura 5. 27 Montagem experimental para o ensaio de componente

De acordo com a nomenclatura supradefinida para as massas calibradas, os valores desejados para a solicitação de força foram obtidos através das seguintes configurações (Tabela 5.13):

Tabela 5. 13 Combinação de pesos utilizada no ensaio de componente

Força [N]	Combinação de pesos calibrados
1	Suporte
2	Suporte + I
3	Suporte + I + II
4	Suporte + I + II + III
5	Suporte + I + II + III + IV
6	Suporte + VI
7	Suporte + VI + I
8	Suporte + VI + I + II
9	Suporte + VI + I + II + III
10	Suporte + VI + I + II + III + IV
11	Suporte + VI + VII
12	Suporte + VI + VII + I
13	Suporte + VI + VII + I + II
14	Suporte + VI + VII + I + II + III
15	Suporte + VI + VII + I + II + III + IV
16	Suporte + VI + VII + VIII + I
17	Suporte + VI + VII + VIII + I + II
18	Suporte + VI + VII + VIII + I + II + III
19	Suporte + VI + VII + VIII + I + II + III + IV

Todas as medições foram efetuadas com a craveira encostada a um ponto estático de referência acima da peça e estabilizada lateralmente para assegurar a precisão da medição. Os resultados para os valores de deslocamento do ponto de medição foram registados em Excel.

5.3.5 Resultados

Foram registados os valores do deslocamento do ponto de medição em duas situações, durante e imediatamente após a aplicação da carga. A decisão de medir a influência da carga após a sua aplicação tem como objetivo a análise da deformação na peça devida à influência do recuperação elástico do nylon. Os valores para o deslocamento do ponto de medição sob carga e a sua distância ao ponto de referência após a aplicação da carga são seguidamente tabelados (Tabela 5.14):

Tabela 5. 14 Valores para o deslocamento e recuperação do ponto de medição no ensaio experimental

Força [N]	Deslocamento máximo dy. [mm]	Deslocamento após a carga drec. [mm]
1	0	0
2	0,2	0
3	0,4	0,2
4	0,6	0,2
5	0,75	0,2
6	0,95	0,2
7	1,2	0,2
8	1,35	0,3
9	1,55	0,3
10	1,9	0,3
11	2,1	0,3
12	2,7	0,3
13	3,2	0,35
14	3,65	0,4
15	3,8	0,5
16	4,3	0,6
17	4,5	0,6
18	5,05	0,6
19	5,3	0,75

A representação gráfica dos deslocamentos medidos foi elaborada e comparada com os resultados obtidos nas simulações. Os três gráficos resultantes são seguidamente apresentados (Figura 5.28):

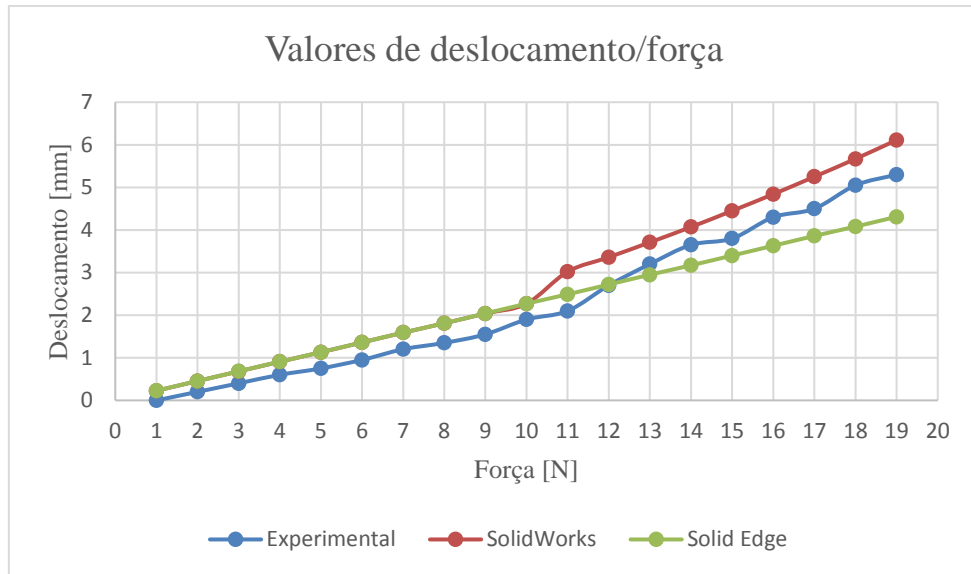


Figura 5. 28 Gráfico dos valores de deslocamento máximo para o ponto de medição, experimentais e das simulações

6 Análise de Resultados

Neste capítulo do relatório serão feitos a análise e o comentário dos dados obtidos e evidenciados no capítulo de Ensaio Experimentais. Os testes relativos a cada ensaio e a sua concordância com as simulações efetuadas serão analisados individualmente. No fim das secções dedicadas aos ensaios de subcomponente e componente é feita a análise do cumprimento dos objetivos definidos no capítulo anterior.

6.1 Teste de Provetes

O teste de provetes foi idealizado para emular o tipo de testes realizado no primeiro bloco de testes do método de *building blocks*. O principal objetivo de testes deste tipo é a aferição das propriedades mecânicas geral do material processado sob estudo.

O resultado mais óbvio da tração dos provetes de nylon-6, nas condições impostas pela norma ISO 527, é a elevada capacidade que este tem de se deformar plasticamente sem fraturar. Com efeito, apenas dois de um total de dez provetes foram levados à fratura, os provetes 1 e 5 da série de 0°/90° (Figura 6.1). As fraturas ocorreram de maneira limpa e na direção normal ao eixo de tração (90°), na zona de medição. A elevada plasticidade do nylon 6 processado por impressão 3D foi evidenciada no facto de todos os outros provetes terem sido esticados ao longo de todo o comprimento possível na máquina utilizada. Tal também se verifica nos ensaios similares executados para o teste de propriedades mecânicas de ABS reforçado em *Dorigato et al., 2017*, onde, apesar de uma existência mais notável de limites entre regime elástico e plástico, a deformação plástica é uniforme, não se verificando qualquer estricção na zona de fratura.



Figura 6. 1 Série de provetes -45°/45° e 0°/90° traccionados

São seguidamente ilustradas as zonas de fratura dos provetes 1 e 5 da série 0°/90° (Figura 6.2). Não se verificou, em ambos os casos, a existência clara de uma zona de estricção na zona de fratura. Este facto também é confirmado pelo declive consistentemente positivos nas curvas tensão/extensão de todos os provetes.



Figura 6. 2 Fractura do provete 1 da série 0°/90°

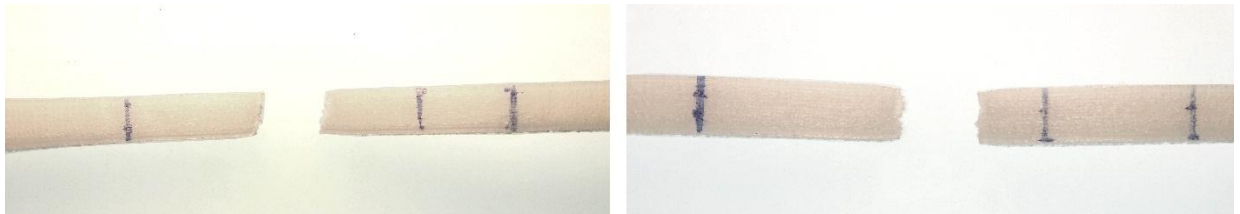


Figura 6. 3 Pormenores da zona de fractura dos provetes 1 e 5 da série 0°/90°

É notável a grande divergência existente entre os valores para o Módulo de Young calculados para cada provete. Para analisar a dispersão dos valores de cada provete no cálculo do Módulo de Young, foram calculadas a variância das médias e o desvio padrão para cada uma das séries.

Para a série de -45°/45°

$$\begin{aligned} var(\bar{X}_1) &= \frac{(520.22 - 398.95)^2 + (268.24 - 398.95)^2 + (418.24 - 398.95)^2 + (406.68 - 398.95)^2 + (380.33 - 398.95)^2}{5} \\ &= 6514 \Rightarrow \sigma_1 = 80.71 \end{aligned}$$

Para a série de 0°/90°

$$\begin{aligned} \text{var}(\bar{X}_2) &= \frac{(466.77 - 475.91)^2 + (507.96 - 475.91)^2 + (533.54 - 475.91)^2 + (392.19 - 475.91)^2 + (476.59 - 475.91)^2}{5} \\ &= 2288.3 \Rightarrow \sigma_2 = 47.8 \end{aligned}$$

Como é possível observar pela variância e desvio padrão das médias de cada série, os resultados obtidos para a série 0°/90°, σ_2 , encontram-se bastante mais em sintonia que os obtidos para a série -45°/45°. Isto é também observável no aspeto das curvas de tensão/extensão para cada uma das séries, visto que são muito mais coincidentes e convergentes para os provetes da série 0°/90° que para os da série -45°/45°.

Apesar de uma divergência pouco satisfatória entre os resultados obtidos para cada provete (especialmente da série -45°/45°) nota-se um aspeto comum a todos capaz de contribuir para a desadequação do método de cálculo do Módulo de Young segundo o método da norma ISO-527. Enquanto são evidentes a presença de um domínio elástico e de um plástico na curva de tensão extensão de cada provete, a transição entre os dois regimes não é tão fácil de distinguir (Figura 6.4). O domínio elástico das curvas de tensão/extensão dos provetes tem uma evolução curvilínea (não linear) com o aumento da força, e não retilínea. O domínio plástico desenvolve-se com um menor declive do que na região elástica, mas de acordo com uma deformação não uniforme do nylon quando passa da sua tensão de cedência. A tensão de cedência, por sua vez, torna-se bastante difícil de visualizar, parecendo estar compreendida entre os 12 MPa e os 15 MPa para os dois casos, com base no aumento acentuado do declive da curva que se dá nesse espectro de tensões, consideravelmente mais evidente na série 0°/90° que na série -45°/45°. Especula-se, portanto, que se a regressão linear feita para calcular o Módulo de Young abrangesse mais pontos iniciais da curva de tensão extensão, haveria uma maior convergência de valores para o módulo entre provetes, fornecendo assim resultados com maior acuidade, tendo em conta a componente curvilínea do regime elástico da curva. Adicionalmente, para este tipo de material, um tipo de provete com uma secção de área mais reduzida resultaria em valores mais uniformes e na determinação de mais variáveis, visto que contribuiria para que mais provetes fossem fraturados, como nos ensaios executados em *Ferro et al., 20160*, onde se utilizou uma norma ASTM.

Outro aspeto verificado após os ensaios consistia na elevada recuperação elástica dos provetes ensaiados e que não sofreram fratura (Figura 6.1).

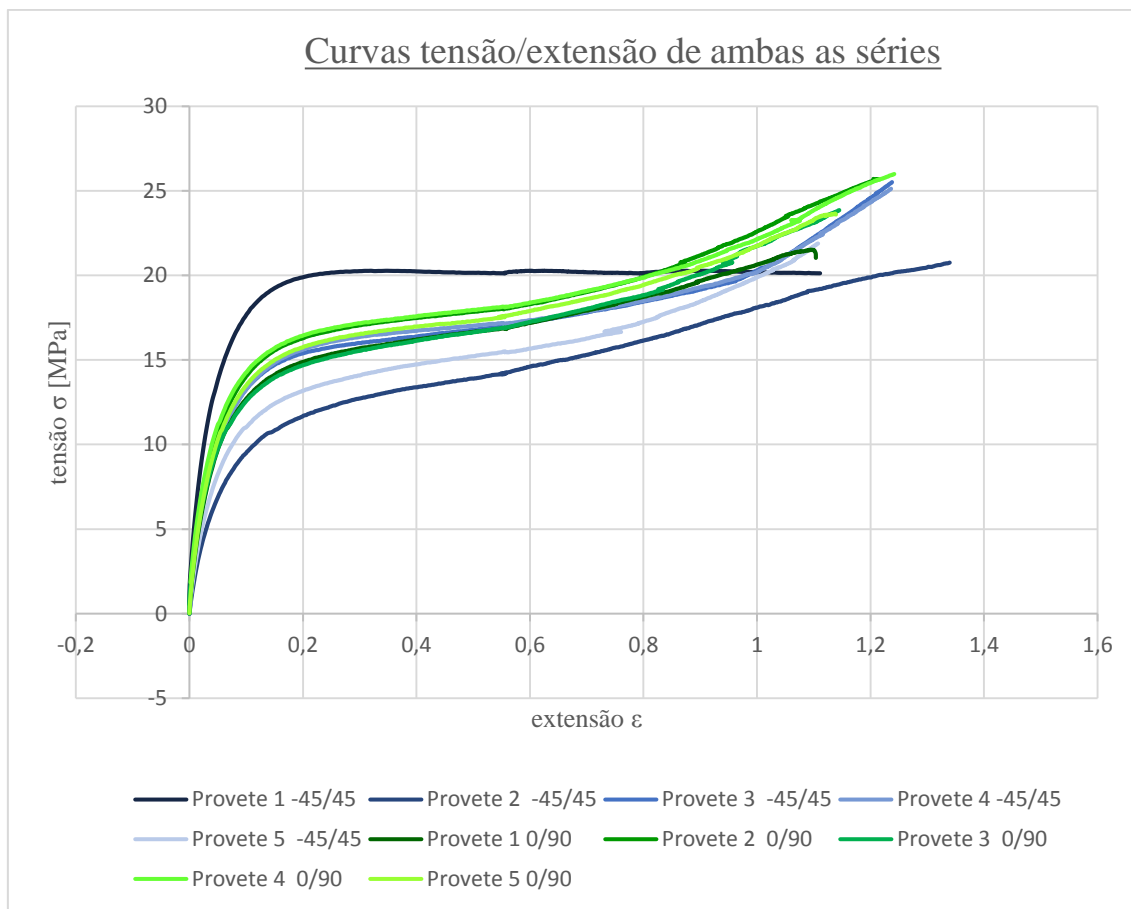


Figura 6. 4 Gráfico de cruvas tensão/extensão dos provetes de ambas as série

Relativamente às diferenças dos dois tipos de orientação de deposição do material, a divergência das curvas tensão/extensão dos provetes da série $-45^{\circ}/45^{\circ}$ cobre todos os resultados da série $0^{\circ}/90^{\circ}$. Uma das principais dúvidas que surge deste facto é a razão pela qual duas estruturas anisotrópicas organizadas em orientações diferentes resultam em curvas tão próximas. Enquanto que o aspeto dos provetes de cada série diverge após a tração, considera-se que, na maioria dos casos, a homogeneidade conferida às secções transversais dos provetes aquando da sua impressão em nylon é a responsável pela sintonia dos valores entre séries. Nota-se, contudo, que o facto de nenhum dos provetes da série $-45^{\circ}/45^{\circ}$ terem fraturado se deve ao facto das fronteiras entre as linhas de deposição do material nesta série não terem sido solicitadas transversalmente, ao contrário do material depositado a 0° nos provetes da série $0^{\circ}/90^{\circ}$.

6.2 Teste de subcomponentes

A primeira conclusão retirada do ensaio do subcomponente (reservatório pressurizado) prende-se com a impressão da peça em si. Enquanto que os resultados dos testes do ensaio foram

os mais divergentes do modelo computacional, a impressão do provete de teste foi de longe a mais fácil. A geometria esférica do reservatório implicou a divisão do modelo computacional em *slices* circulares. A aderência do nylon 6 à plataforma neste tipo de formato provou-se muito mais fácil de obter que na impressão dos provetes e do cabide. Enquanto que este fator não fornece dados concretos sobre o comportamento do nylon, o tipo de conhecimento empírico adquirido com a impressão dos provetes é útil na caracterização do processo de impressão 3D, podendo ser utilizado em projetos de impressão futuros.

Os resultados obtidos nas simulações em *SolidWorks* e em *Solid Edge* foram consistentes entre eles. Contudo, o ensaio experimental evidenciou valores de deformação bastante menores que os obtidos nas simulações computacionais. Tal disparidade torna difícil o cálculo do erro relativo, visto que não se pode saber se a divergência entre resultados advém de condicionamentos não planeados no teste ou da inadequação dos métodos de simulação utilizados, tornando impossível definir qualquer um dos resultados como o “valor verdadeiro”. O facto de este ensaio se debruçar sobre as características estruturais do subcomponente e não sobre as propriedades mecânicas do material torna esta tarefa ainda mais complicada. Observa-se, contudo, uma evolução bastante similar com o aumento de pressão nos três tipos de valores. Para estudar comparar o aumento do deslocamento do ponto, de pressão para pressão, dos três conjuntos de valores obtidos, mostram-se as linhas de tendência da evolução dos três valores de deslocamento, consoante as três pressões.

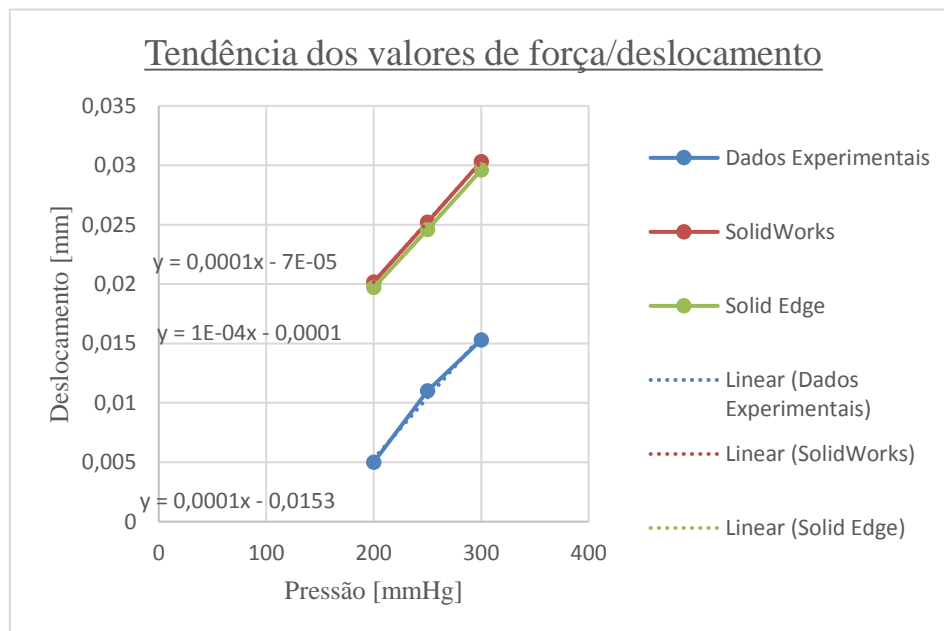


Figura 6. 5 Tendência de valores experimentais e das simulações para o deslocamento do ponto de medição do reservatório

Tendo em conta que as retas de tendência das duas simulações e dos dados do teste apresentam declives muito semelhantes, a evolução das deformações com o aumento de pressão no reservatório tem um comportamento constante. Futuros ensaios de teste deste subcomponente terão que ser melhorados, a adequação dos métodos de simulação será revista e o próprio teste repensado, até que haja concordância dos valores. Questiona-se também o uso direto das propriedades do material definidas no teste de provetes nas circunstâncias do teste de subcomponentes. Contudo, os resultados do teste de componentes parecem validar o uso destas propriedades como descritivas do material.

Seguidamente, é feito um sumário da análise de resultados para este ensaio, coordenado com os objetivos definidos para o mesmo no capítulo anterior:

1. A impressão do reservatório em Nylon-6 mostrou-se a menos problemática de todas as executadas para esta tese de mestrado. O resultado da impressão é homogéneo, resiliente e demonstra baixos níveis de deformação tendo em conta o seu propósito.
2. O Nylon-6 processado por impressão 3D criou um reservatório perfeitamente estanque, sendo que não foi verificado qualquer tipo de fugas ou dano do material em toda a sua superfície.
3. A disparidade entre os resultados das simulações e os dos testes levanta dúvidas sobre a possibilidade do uso direto das propriedades verificadas nos testes de provetes, sendo que trabalho futuros terão de melhorar o modelo.
4. A disparidade entre os resultados das simulações e os dos testes levanta dúvidas sobre a adequação dos softwares de simulação utilizadas. A semelhança entre os resultados do *SolidWorks* e *Solid Edge* faz surgir a possibilidade de falhas na simulação do teste. Quer no cabide quer no reservatório, os valores simulados são consistentemente mais elevados do que os medidos experimentalmente.
5. A evolução do deslocamento do ponto de medição foi semelhante à presente nas simulações, apesar da disparidade dos valores.

6.3 Teste de componentes

A impressão do cabide provou-se uma tarefa difícil por razões similares à dos provetes. Devido à configuração geométrica da peça, o apuramento das técnicas necessárias à aderência da peça na plataforma de impressão foi feito através de um moroso processo de tentativa e erro, no qual foram testadas várias posições de impressão aliadas à variação dos parâmetros de impressão (Figuras 6.6 e 6.7). A experiência adquirida na anterior impressão dos provetes provou-se, contudo, de grande utilidade para a análise do comportamento do Nylon-6 quando impresso.

Apesar das dificuldades de impressão, o produto final mostrou-se coeso, resiliente e perfeitamente capaz de desempenhar a sua função, mesmo com um *infill* de 50%.



Figura 6. 6 Tentativas de impressão do cabide em várias posições



Figura 6. 7 Pormenor da distorção da peça devida à falta de aderência do material à plataforma

Considera-se que houve sintonia entre os resultados das simulações e o ensaio experimental, tendo os valores de deflexão do ponto de medição escolhido (Figura 6.8) sido acompanhados pelos valores debitados pelas simulações, com mais ou menos acuidade de carga para carga.



Figura 6. 8 Visível deflexão do cabido sob diferentes cargas (2N e 19N)

Tomando os valores do ensaio experimental como “valores verdadeiros”, segue a tabela conjunta dos valores para a deflexão do ponto de medição obtidos nos testes e em cada uma das simulações nos dois *softwares* diferentes, acompanhados pelo erro relativo das simulações face aos resultados experimentais (excetuando 1N de força, para o qual não se registou deslocamento durante o teste):

Tabela 6. 1 Cálculo de erros relativos dos valores das simulações para o deslocamento do ponto de medição

Força [N]	d_y Experimental [mm]	d_y SolidWorks [mm]	E.R. SolidWorks [%]	d_y Solid Edge [mm]	E.R. Solid Edge [%]
1	0	0,225	N.A.	0,227	N.A.
2	0,2	0,454	127	0,454	127
3	0,4	0,68	70	0,681	70,25
4	0,6	0,907	51,16	0,908	51,33
5	0,75	1,13	50,66	1,13	50,66
6	0,95	1,36	43,15	1,36	43,15
7	1,2	1,59	32,5	1,59	32,5
8	1,35	1,81	34,07	1,81	34,07
9	1,55	2,04	31,61	2,04	31,61
10	1,9	2,27	19,47	2,27	19,47
11	2,1	3,02	43,80	2,49	18,57
12	2,7	3,36	24,44	2,72	0,740
13	3,2	3,71	15,93	2,95	7,812
14	3,65	4,07	11,50	3,17	13,15
15	3,8	4,45	17,10	3,4	10,52
16	4,3	4,84	12,55	3,63	15,58
17	4,5	5,25	16,66	3,86	14,22
18	5,05	5,67	12,27	4,08	19,20
19	5,3	6,11	15,28	4,31	18,67

Enquanto que os primeiros valores apresentam grandes erros para os valores das simulações, a partir dos 7N, os valores começam a convergir satisfatoriamente e os erros

começam a diminuir, sendo que os valores obtidos através das simulações em *SolidWorks* revelam uma melhor aproximação à curva de resposta obtida experimentalmente.

As curvas criadas com a representação gráfica dos dados tabelados (Figura 5.28) revela relativa coincidência entre os valores obtidos por *SolidWorks* e os obtidos por *Solid Edge* até aos 10N a partir do qual o *Solid Edge* mantém o tipo de evolução linear contrariamente ao *SolidWorks*, cuja aparente recta aumenta de declive e começa a divergir. Este fenómeno é explicado pelo facto de, aquando da elaboração das simulações, o *SolidWorks* interpretar as deformações obtidas com valores de 10 N e superiores como grande demais para um problema linear, começando a interpretar as simulações dos consequentes deslocamentos como problemas não lineares de tipo geométrico. Tal não aconteceu com o *Solid Edge*. Os valores obtidos experimentalmente vieram confirmar a interpretação do *SolidWorks*, visto que, após os 10N, este começa a emular o deslocamento real do ponto de medição mais fielmente que o *Solid Edge*, que, por sua vez, se começa a afastar dos outros dois conjuntos de resultados.

A comparação de resultados entre os valores experimentais e os das simulações (especialmente a de *SolidWorks*) dá a entender que a passagem e utilização do conhecimento adquirido nos testes de provetes para o teste de componentes foi uma decisão adequada.

Seguidamente é resumida a análise de resultados do ensaio de componentes, através dos objetivos referidos no capítulo anterior:

1. O processo de impressão do cabide foi dificultado pela falta de aderência do nylon à plataforma, tendo o conhecimento técnico adquirido neste aspeto na impressão dos provetes sido útil. O provete impresso foi, contudo, de qualidade satisfatória.
2. A introdução das propriedades mecânicas adquiridas através do ensaio de provetes nas simulações do ensaio de componentes foi feita com sucesso, tendo sido obtido uma simulação em *SolidWorks* que emula convenientemente o comportamento do cabide sob carga.
3. O comportamento da deflexão do cabide sujeito às cargas impostas foi definido através da comparação dos dados experimentais com os fornecidos pelas simulações.
4. Os métodos de simulação mostraram-se relativamente capazes de prever o comportamento do material, tendo o *SolidWorks* apresentado os melhores resultados e o *Solid Edge* ficado aquém para os valores de carga mais altos.
5. A introdução do reforço no cabide foi facilmente executada através do método de impressão 3D, tendo-se mostrado benéfica à funcionalidade do componente.

7 Conclusões

O processo de impressão 3D mostra um elevado potencial para revolucionar os conceitos melhor estabelecidos na área de desenvolvimento de produtos novos e de melhoramento dos existentes. A inovação que promete consiste em algo de novo, do ponto de vista em que a tecnologia está desenvolvida para a produção de peças finais, com necessidades mínimas de maquinação em pós-processamento. Contudo, enquanto que já é estudada muito para além das suas capacidades de prototipagem, a inovação que a impressão 3D traz à indústria requer ainda muitos esforços de todos os agentes envolvidos para que as barreiras com que ainda se depara sejam superadas e para que possa de facto ser utilizada e todas as suas capacidades como um método de manufatura eficiente e de confiança.

A presente tese de mestrado baseou-se em toda a pesquisa bibliográfica feita sobre as dificuldades que esta nova tecnologia tem de enfrentar e almeja contribuir para a futura mitigação dessas dificuldades. Face ao conhecimento adquirido, foi testada a hipótese da utilização do método de *building blocks* como meio de integração desta tecnologia num contexto industrial de uma maneira que não só procura o rigor e a validação do conhecimento, como também sustentabilidade e a diminuição dos custos envolvidos num programa de testes, de um modo lógico, iterativo e bem definido.

A variabilidade dos modos de impressão 3D mencionada na Introdução é ainda afetada igualmente pelos problemas da técnica em si. As questões de normalização e caracterização que afetam a impressão 3D são relativamente comuns ao SLS, DED, estereolitografia e extrusão de polímero. Enquanto que as diversas técnicas trabalham com tipos de material tão diferentes entre si quanto elas próprias, ainda muito pouco é conhecido sobre os fenómenos e transformações que o material sofre durante o processo e as capacidades estruturais da peça final, seja feita de liga de titânio ou nylon, por exemplo. Enquanto que são todas afetadas, a situação da normalização é ligeiramente melhor para os processos que lidam com materiais metálicos como o SLS e o SLM (*selective laser melting*), talvez devido ao maior investimento financeiro que acarretam. Foi por isso decidido estudar a extrusão de polímero nesta tese, devido à sua acessibilidade e relativa facilidade de apreensão das técnicas necessárias para trabalhar com as impressoras.

No Manual de Compósitos do Departamento de Defesa Norte-Americano, de onde foi retirado a versão do método de *building blocks* destinada à aplicação em materiais compósitos de matriz polimérica, está patente que, enquanto que a execução de um programa de testes segundo o método de *building blocks* não é algo recente, as características deste método é ideal para a sua aplicação em materiais de caracterização difícil, sendo que tanto no fabrico de materiais compósitos tal como no processamento de polímeros por impressão 3D a anisotropia das peças

finais é a principal responsável por tais dificuldades. Este é o ponto de partida para a hipótese sugerida nesta tese de que o método de *building blocks* pode também ser aplicado com sucesso e benefícios à técnica de impressão 3D. O Manual avisa também que a estrutura de testes que o método de *building blocks* acarreta não é estrita nem de escopo geral: enquanto que grande parte das aplicações do método envolverão o recurso aos tipos de teste de todos os blocos, muitas também farão recurso a apenas alguns blocos para a satisfação dos parâmetros de projeto.

Acima de tudo, o método de *building blocks* requer a complementação dos testes executados com todas as técnicas de análise pertinentes de serem usadas no problema. Os ensaios experimentais desta tese foram feitos precisamente com esse propósito em mente. Os testes foram constantemente comparados com as simulações e métodos de previsão das características do material/estrutura que queriam representar, sendo um dos principais aspetos a retirar da análise de resultados a sintonia entre os resultados obtidos de maneira diferente para a caracterização das propriedades mecânicas e comportamento estrutural do Nylon-6, quando processado por impressão 3D.

Num esforço para a caracterização das propriedades mecânicas de tensão do Nylon-6 extrudido, os testes de provetes decorreram de acordo com a norma ISO 527. Enquanto que esta norma não foi elaborada para o teste de peças obtidas por impressão 3D, a sua adaptabilidade a esta técnica foi verificada após as necessárias adaptações. Os resultados obtidos para a série de provetes 0°/90° foram bastante mais consistentes que os da série -45°/45°, sendo por isso considerados mais satisfatórios. Enquanto que houve relativa sintonia das curvas tensão/extensão entre as séries de provetes (especialmente dentro da série referida), a aplicação do método definido pela norma para a determinação do Módulo de Young deu resultados divergentes. Conjetura-se, por isso, se o cálculo desta grandeza para um material com a plasticidade e elevada recuperação elástica do Nylon-6 (e de muitos dos outros materiais processados por impressão 3D) deverá ser feito de outra maneira, como a definição do declive de uma regressão linear que englobe mais pontos do regime elástico do material.

O teste de subcomponente foi projetado para a análise de uma característica específica de um componente ou peça final, através de um provete que emula a parte do componente que se prende com tal característica. No caso estudado, testou-se à escala a casca de um reservatório baseado numa peça já existente para a aferição do comportamento de deformação sob pressão interna. Enquanto que os resultados do teste foram divergentes dos adquiridos através de simulações, especula-se que ou a caracterização do material com base nos dados adquiridos no teste de provetes foi incompleta ou os softwares de modelação não conseguiram emular o comportamento do material tendo em conta os relativamente baixos valores de pressão. Um

estudo mais aprofundado deste tipo de peça implicaria o teste de outras partes do reservatório e a aferição da reatividade química do Nylon-6.

A transmissibilidade das propriedades mecânicas definidas através dos testes de provetes verificou-se no teste de componente. A escolha do caso de estudo para o provete de teste prendeu-se com a simplicidade do cabide. Com efeito, este é um dos casos em que não seria necessário recorrer a todos os blocos do método para a validação do uso do material e do processo no fabrico da peça final. A elaboração deste caso de estudo envolveria a determinação de mais características do modelo e do material como, por exemplo, teste de esmagamento dos furos aliados à carga de serviço da peça (teste de elementos) e do gancho inferior do cabide (teste de subcomponentes).

Enquanto que não foi realizada aplicação do método de *building blocks* num caso de estudo completo, i.e. uma situação de projeto em que todos os testes de validação do material fossem aplicados a todos os elementos da peça, procurou-se principalmente analisar a correlação entre a informação sobre características inerentes ao material extrudido dos testes de provetes e as características estruturais dos espécimes projetados. Isto foi confirmado, especialmente no teste de componente, pela semelhança entre os resultados das simulações onde o material foi caracterizado segundo as características definidas e os resultados dos testes.

Finalizando, o método de impressão 3D consiste numa ferramenta de fabrico que terá elevado valor científico e financeiro no futuro. Talvez a sua característica mais gritante é o facto de, muito mais que em outros processos de manufatura, a complexidade da peça final não ser o fator mais importante durante a impressão. A facilidade que este processo tem em trabalhar peças simples e complexas é a mesma, desde que a modelação da peça e a parametrização da impressora seja adequada. Contudo, a caracterização de um material quando processado por um método tão recente requer um acompanhamento científico para que se possa obter o desempenho desejado da peça. A impressão 3D é uma tecnologia nova que se mostra muito promissora. Cada vez existem mais materiais para serem processados, impressoras mais capazes e robustas e mais áreas em que esta tecnologia pode ser aplicada. É preciso um esforço conjunto da comunidade académica, das empresas fornecedoras e clientes e de todos os utilizadores individuais para que a normalização deste método de manufatura seja capaz de acompanhar a sua evolução tecnológica, e assim fazerem mostrar todo o potencial da impressão 3D, capaz de revolucionar a Indústria no futuro.

Referências

Normas

ISO 291:1977 *Plastics – Standard atmospheres for conditioning and testing*

ISO 527-1:2002 *Plastics Determination of Tensile Properties – Part 1: General Principles*

ISO 527-4:1997 *Plastics Determination of Tensile Properties – Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*

ISO 2602:1980 *Statistical interpretation of test results – Estimation of the mean – Confidence intervals*

Artigos

A. Boschetto, F. Veniali; “*Intricate shape prototypes obtained by FDM*”; Int J Mater Form Vol. 3 Suppl 1, pp. 1099–1102, (2010)

A. Dorigato, V. Morettia, S. Dul, S.H. Unterberger, A. Pegoretti; “*Electrically conductive nanocomposites for fused deposition modelling*”; Synthetic Metals 226, pp.7–14, (2017)

Aaron M. Forster (NIST); “*Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability*”; NISTIR 8059, (2015)

Al C. de Leon, Qiyi Chen, Napolabel B. Palaganas, Jerome O. Palaganas, Jill Manapat, Rigoberto C. Advincula; “*High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications*”; Reactive and Functional Polymers 103, pp. 141–155 (2016)

Barry Berman; “*3-D printing: The new industrial revolution*”; Business Horizons 55, pp. 155-162, (2012)

Biranchi N., Panda, K. Shankhwar, Akhil Garg & Zhang Jian; “*Performance evaluation of warping characteristic of fused deposition modelling process*”; Int J Adv Manuf Technol 88, pp.1799–1811, (2017)

C. Gosselin, R. Duballet, Ph. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, Ph. Morel; “*Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders*”; Materials and Design 100, pp. 102–109, (2016)

Carlo Ferro, Roberto Grassi, Carlo Seclì, Paolo Maggiore; “*Additive Manufacturing Offers New Opportunities in UAV Research*”; Procedia CIRP 41, pp. 1004 – 1010, (2015)

Colin Baker; “*3D-printing: Game Changer*”; AsianAviation – OCTOBER, pp.36-39, (2014)

Dara G. Schniederjans; “*Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis*”; Int. J. Production Economics 183, pp. 287–298, (2016)

Department of Health and Human Services (EUA) – Food and Drugs Administration; “*Technical Considerations for Additive Manufactured Devices – Draft Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff*”; 2016

Joel J. Otero, An Vijverman, Maurice Y. Mommaerts; “*Use of fused deposit modeling for additive manufacturing in hospital facilities: European certification directives*”; Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery 45 (2017)

Kenneth J.A. Brookes; “*Aviation finds that extra dimension*”; Metal Powder Report - Volume 70, Number 5, pp. 239-244, (2016)

Kazi Moshir Rahman, Todd Letcher, Riley Reese; “*Mechanical Properties of Additively Manufactured PEEK Components Using Fused Filament Fabrication*”; IMECE2015-52209, ASME, (2015)

K.S. Boparai, R. Singh, F. Fabbrocino, F. Fraternali; “*Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing applications*”; Composites Part B: Engineering – Vol.106, pp.42-46, (2016)

Liz Nickels; “*Additive manufacturing: A user’s guide*”; Metal Powder Report - Volume 71, Number 2, pp. 100-105, (2016)

Joan Pelegrino; Tommi Makila; Shawna McQueen; Emanuel Taylor (NIST); “*Measurement Science Roadmap for Polymer-Based Additive Manufacturing*”; NIST Advanced Manufacturing Series 100-5, (2016)

Petter Hagqvist, Almir Heralić, Anna-Karin Christiansson, Bengt Lennartson; “*Resistance measurements for control of laser metal wire deposition*”; Optics and Lasers in Engineering 54, pp. 62–67, (2014)

Paolo C Priarone, Giuseppe Ingarao; “*Towards criteria for sustainable process selection: On the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches*”; Journal of Cleaner Production 144, pp. 57-68, (2017)

Sithiprumnea Dul, Luca Fambri, Alessandro Pegoretti ; “*Fused deposition modelling with ABS–graphene nanocomposites*”; Composites: Part A 85, pp.181–191, (2015)

Sunpreet Singh, Seeram Ramakrishna, Rupinder Singh; “*Material issues in additive manufacturing: A review*”; Reactive and Functional Polymers 103, pp. 141–155, (2016)

Thomas Stichel, Thomas Frick, Tobias Laumer, Felix Tenner, Tino Hausotte, Marion Merklein, Michael Schmidt; “*A Round Robin study for Selective Laser Sintering of polyamide 12: Microstructural origin of the mechanical properties*”; Optics & Laser Technology 89, pp. 31–40, (2017)

Vojislav Petrovic, Juan Vicente Haro Gonzalez, Olga Jordá Ferrando, Javier Delgado Gordillo, Jose Ramón Blasco Puchades, Luis Portolés Griñan; “*Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies*”; International Journal of Production Research Vol. 49, No. 4, pp. 1061–1079, (2011)

Livros

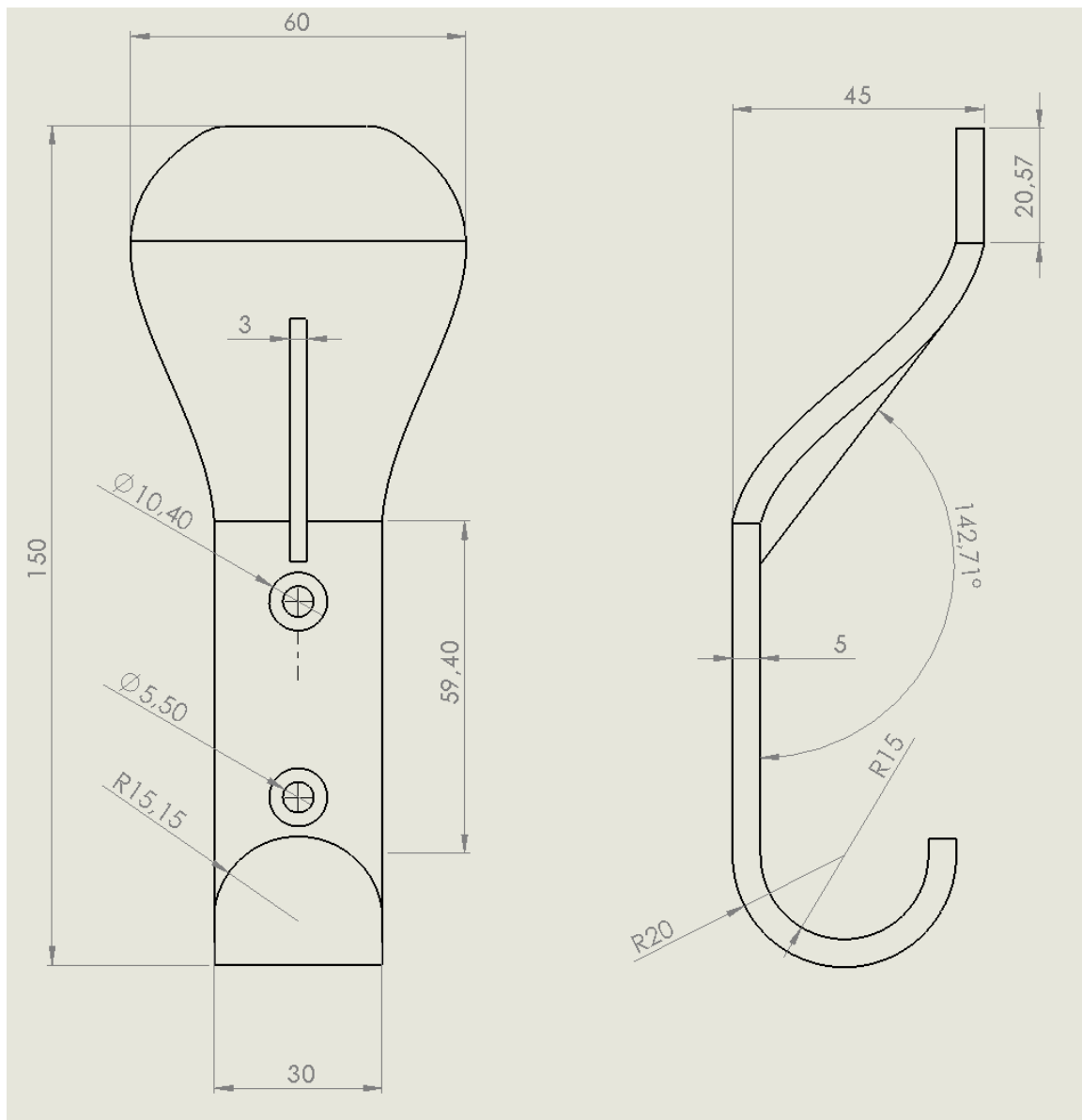
Ansel Ugural; *Stresses in plates and shells*, 2nd edition, MacGraw-Hill; 1999

Department of Defense (EUA); “*Composite Material Handbook; Volume I*”; 2002

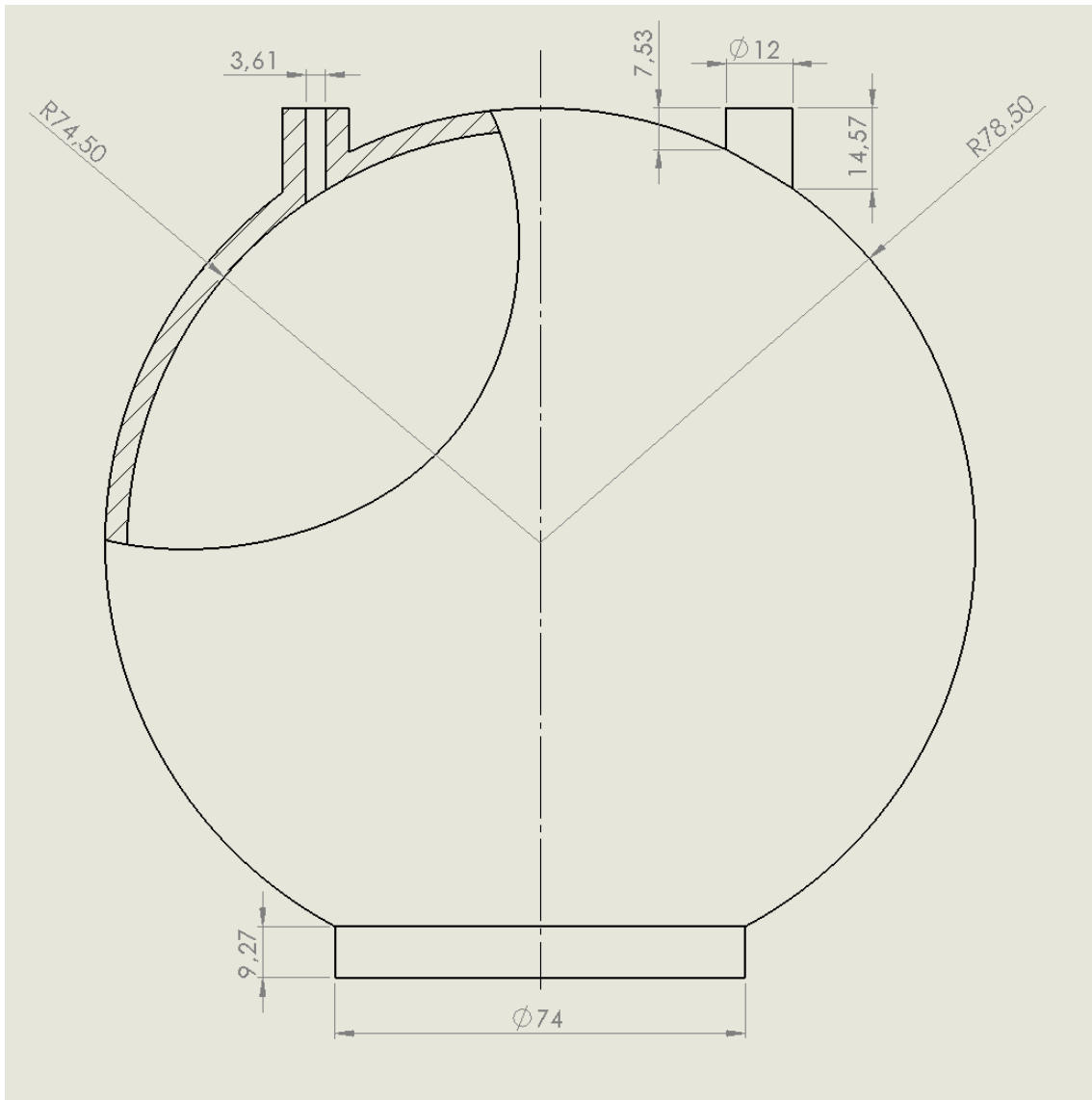
Department of Defense (EUA); “*Composite Material Handbook; Volume III*”; 2002

Anexos

A - Dimensões do Cabide

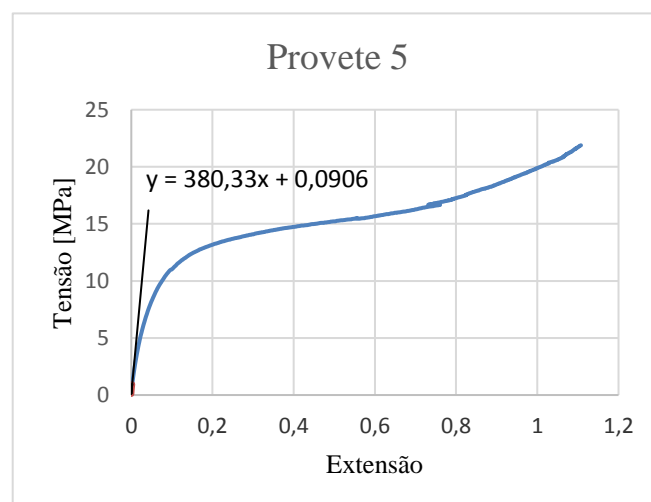
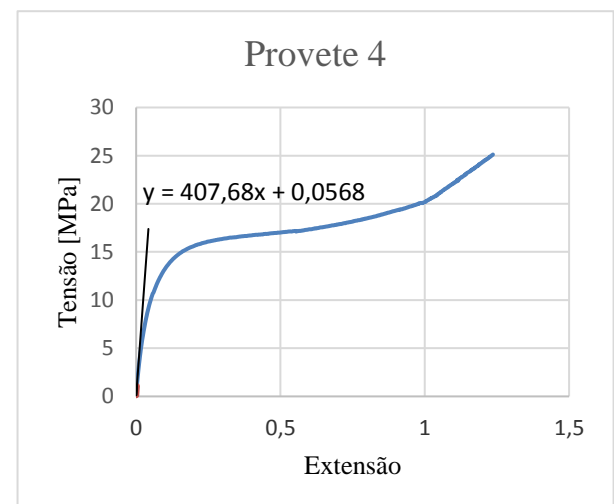
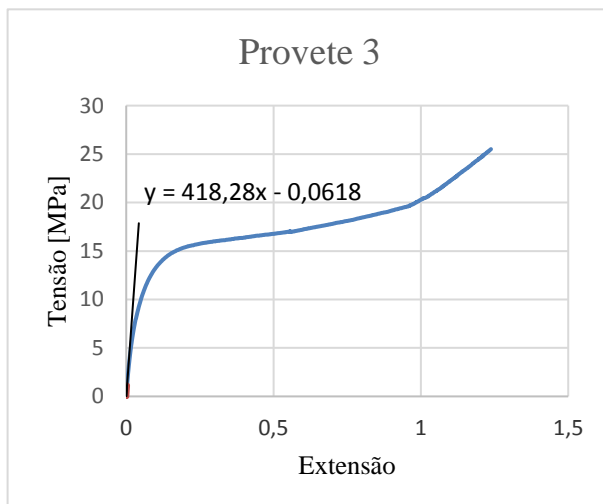
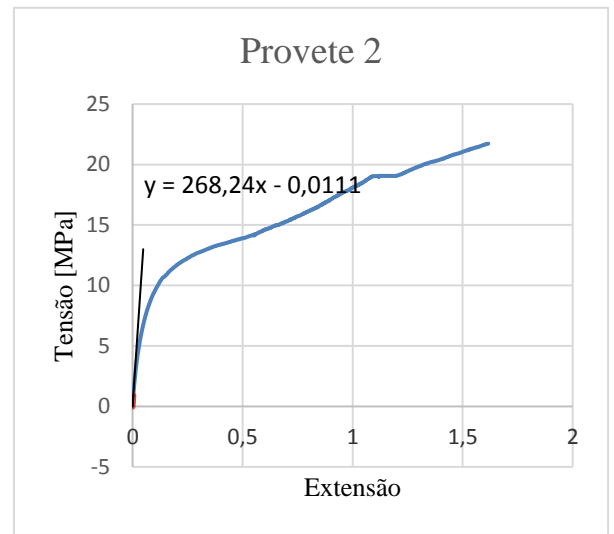
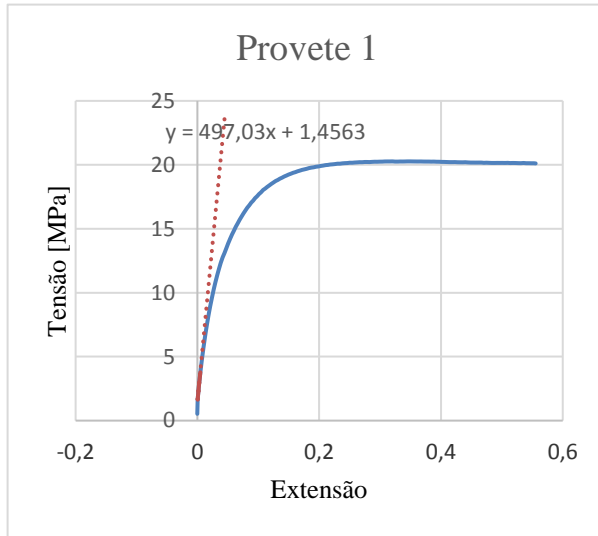


B - Dimensões do Reservatório

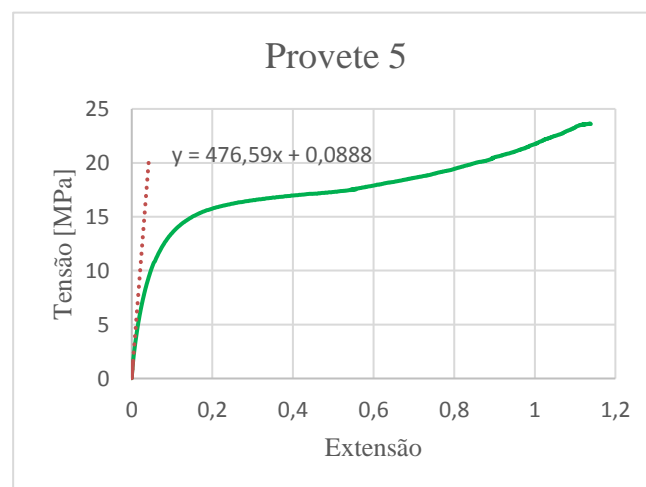
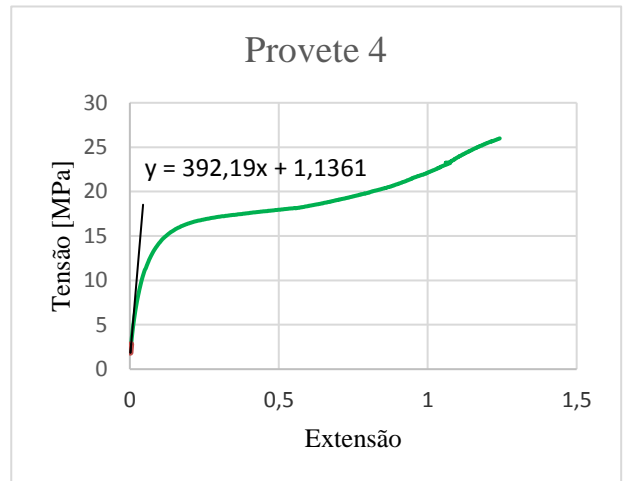
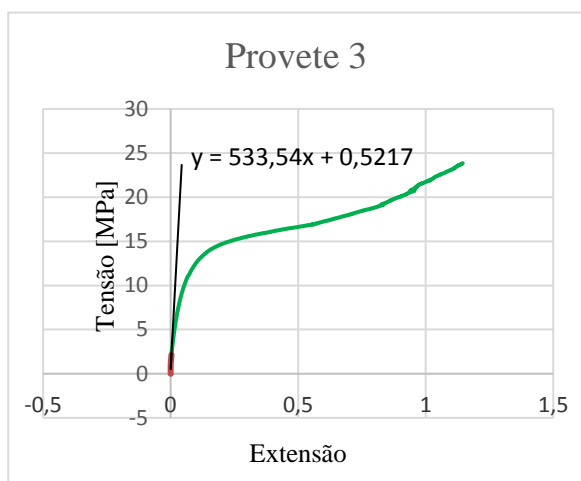
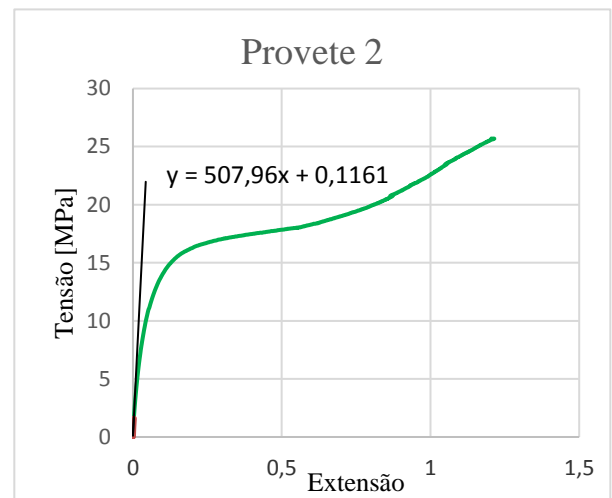
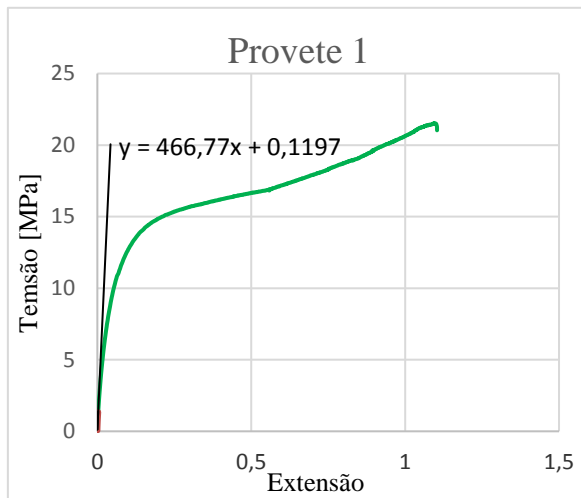


(Nota: No ensaio de subcomponente, o espécimen utilizado foi uma reprodução deste modelo a uma escala 1:2)

C - Resultados individuais para os provetes da série -45°/45°



D - Resultados individuais para os provetes da série 0°/90°



E - Relatório do teste de provetes segundo a norma ISO 527

- a) O presente relatório concerne os ensaios experimentais feitos de acordo com as partes ISO 527-1:2012 e ISO 527-4:1997 da norma ISO 527, com o objetivo de teste de propriedades mecânicas do nylon-6 quando processado por impressão 3D. A norma foi adaptada ao contexto de manufatura por impressão 3D. Foram ensaiados dez provetes de dois tipos diferentes:
- 1x ISO 527-4/1B/2 (tipo -45°/45°)
 - 4x ISO 527-4/1B/10 (tipo -45°/45°)
 - 5x ISO 527-4/1B/10 (tipo 0°/90°)
- b) O material testado foi o nylon-6. O produto adquirido para os testes foi o filamento de nylon-6 Nylon 645, de 3mm, da marca taulman3D, sediada em Montana nos EUA. A informação técnica disponibilizada pelo fornecedor é a seguinte:
- Manufacture Part ID: tau51/tau53
 - HS Code: 3916.9
 - SDS#: TAU-002
- c) O material é um polímero termoplástico, fabricado com o intuito de ser utilizado em impressão 3D por extrusão de polímero. Enquanto que provavelmente foi fabricado por extrusão, nenhuma informação é disponibilizada pelo fabricante nesta matéria. O produto é vendido enrolado em bobines de uma libra (peso), e o filamento tem um diâmetro de 2.85mm.
- d) O tipo de provetes testado foi o 1B, dimensionado de acordo com as dimensões disponibilizadas em ISO 537-4:1997. A zona de teste paralela deste tipo de provetes tem $L=60\pm0.5$ mm de comprimento, $b_1=10\pm0.2$ mm de largura e $h=4$ mm de espessura.
- e) Os provetes de teste foram fabricados por impressão 3D, numa impressora Ultimaker2 da marca Ultimaker. Foram modelados em CAD com o programa SolidWorks 2016 e pré-processados no *slicer* Cura (versão 15.04.6). Os provetes não foram pós-processados de qualquer maneira.

- f) Os provetes de teste não foram cortados de um substrato maior mas foram impressos de duas maneiras. A deposição do material no preenchimento dos provetes foi feita com a orientação de $-45^{\circ}/45^{\circ}$ e de $0^{\circ}/90^{\circ}$ relativamente à direção longitudinal do provete (direção de tração).
- g) Foram testados dez provetes: cinco da série $-45^{\circ}/45^{\circ}$ e cinco da série $0^{\circ}/90^{\circ}$.
- h) Os provetes de teste foram conservados e ensaiados numa atmosfera de 23°C e 50% de humidade relativa.
- i) N.A.
- j) Extensómetro MTS, modelo 632.12C-21
- k) Os provetes foram fixados com garras de actuação mecânica sem que ocorresse escorregamento ou dano nos mesmos.
- l) Os provetes foram tracionados a duas velocidades distintas:
- 1x 2mm/min para a aferição de propriedades
 - 9x 10mm/min para controlo de qualidade
- m) (Anexos 9.3 e 9.4)
- n) (Capítulo 6 – Análise de Resultados; Secção 6.1 – Teste de provetes)
- o) N.A.
- p) Dos provetes testados ocorreu rutura em dois. Nenhum dos provetes foi rejeitado ou substituído.
- q) Os testes decorreram ao longo do dia 25 de Julho de 2017.

